



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

생활과학석사학위논문

총 식이조사를 사용한
한국인의 아크릴아마이드 위해평가

Risk Assessment of Acrylamide
in a Korean Total Diet Study

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

식품영양학과

김 민 정

총 식이조사를 사용한
한국인의 아크릴아마이드 위해평가

Risk Assessment of Acrylamide
in a Korean Total Diet Study

지도교수 권 훈 정

이 논문을 생활과학석사 학위논문으로 제출함

2012년 11월

서울대학교 대학원

식품영양학과

김 민 정

김민정의 생활과학석사 학위논문을 인준함

2013년 1월

위 원 장: _____ (인)

부위원장: _____ (인)

위 원: _____ (인)

국 문 초 록

2002 년, 스웨덴에서 인체발암추정물질로 분류되는 아크릴아마이드의 식품 내 존재 가능성이 발표된 이후, 여러 국가에서는 자국 내 아크릴아마이드 모니터링 및 노출 수준 파악을 위해 노력하고 있다. 최근, 식이를 통한 오염물질의 평가 방법으로 총 식이조사(total diet study)가 제안되고 있으며, 총 식이조사는 섭취 상태를 반영한 식품을 분석함에 따라 실제에 가까운 노출량 산출을 가능하게 한다는 점에서 기존의 모니터링과는 차이가 있다. 따라서 본 연구는 총 식이조사 방법을 이용하여 한국인의 아크릴아마이드 노출량 산출 및 위해평가를 수행하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다소비·다빈도 식품 및 선행연구에서 아크릴아마이드가 고농도로 검출되었던 식품을 고려하여 186 개 시료를 분석 대상 시료로 선정하였다. 각 식품 시료는 섭취 상태를 반영하기 위해 식품 개별 상태로 조리하는 총 식이조사용 표준 조리법으로 조리된 후 분석되었다. 그 결과, 선정된 186 개 시료 중 33 개 시료에서 아크릴아마이드가 검출되었다. 아크릴아마이드는 고온의 열처리를 동반하는 볶기, 튀기기, 굽기의 방법으로 조리된 식품 및 가공식품에서 검출되었으며, 끓이기의 조리방법은 식품 내 존재하는 아크릴아마이드의 함량을 감소시켰다. 국민건강영양조사(2010)의 섭취량 자료를 토대로 산출한 한국인의 아크릴아마이드 식이 노출량은 71 ng/kg bw/day 였다. 이는 JECFA(2005)에서 산출한 노출량($1 \text{ } \mu\text{g/kg bw/day}$)과 비교하였을 때 1/14 수준이다. 감자, 비스킷, 후추분말은 한국인의

아크릴아마이드 노출에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 아크릴아마이드의 위해도는 노출안전력(MOE) 및 초과발암위해도를 통해 평가되었다. 그 결과, 한국인의 식이에서 아크릴아마이드에 대한 위해도는 다른 국가에 비해 낮은 편이지만 여전히 건강 위해 수준에 있는 것으로 확인되었다. 따라서 아크릴아마이드를 저감화시킬 수 있는 조리법에 대한 교육 및 이에 대한 홍보가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

주요어: 아크릴아마이드, 총 식이조사, 한국음식, 노출량, 위해평가

학번: 2011-21636

목차

국문초록.....	i
목차.....	iii
표 목차.....	iv
그림 목차.....	v
약어 목록.....	vi
I. 서론.....	1
II. 문헌고찰	4
III. 재료 및 방법.....	24
III.1. 시약 및 기기.....	24
III.2. 시료 준비.....	26
III.3. 아크릴아마이드 분석.....	30
III.4. 분석법 검증.....	35
III.5. 노출량 산출.....	38
IV. 결과 및 고찰.....	39
IV.1. 분석법 검증.....	39
IV.2. 아크릴아마이드 분석.....	48
IV.3. 노출 평가.....	62
IV.4. 위해도 결정.....	70
V. 요약 및 결론.....	75
VI. 참고문헌.....	77
Acknowledgement.....	83
Abstract.....	84
Appendix	86

표 목차

Table 1. Summary of results of dose-response modeling for induction of selected tumours in rats given drinking-water containing acrylamide	15
Table 2. Summary of results of dose-response modeling for induction of selected tumours in mice given drinking-water containing acrylamide	16
Table 3. Lifetime cancer hazard after exposure to acrylamide in humans	18
Table 4. Foods selected for the acrylamide analysis based on consumption patterns in Korea	28
Table 5. Summary of LC-HRMS analytical conditions	34
Table 6. Recovery of the spiked acrylamide from various sample matrixes	42
Table 7. Accuracy of measured acrylamide concentration compared with certified reference materials	44
Table 8. Inter-individual results for the determination of acrylamide in potato chip	46
Table 9. Inter-day results for the determination of acrylamide in potato chip.....	47
Table 10. Acrylamide levels in table-ready state foods most frequently or highly consumed in Korea	49
Table 11. Estimated dietary exposure and distribution of acrylamide for Korean population	63
Table 12. Estimated acrylamide exposure (ng/kg bw/day) in different age groups	66
Table 13. Ten foods that contribute most to the acrylamide exposure for Korean population	69
Table 14. Health risk estimates for the dietary acrylamide of Korean population	73

그림 목차

Figure 1. Mechanism of acrylamide formation in heated foods	6
Figure 2. Metabolism of acrylamide in human	11
Figure 3. Scheme of acrylamide analysis	32
Figure 4. Standard curve of acrylamide with internal standard	40
Figure 5. Comparision of acrylamide levels by sautéing in different food groups	52
Figure 6. Comparision of acrylamide levels by frying in different food groups	54
Figure 7. Comparision of acrylamide levels by roasting in different food groups	57
Figure 8. Comparision of acrylamide levels by boiling in different food groups	59
Figure 9. Distribution of acrylamide intake (ng/kg bw/day) in different age groups	65

약어 목록

ADI	Acceptable daily intake
BMD	Benchmark dose
BMDL	Lower 95% confidence interval on the benchmark dose
CRM	Certified reference material
CSF	Cancer slope factor
GSH	Glutathione
HLED	Human equivalent lower effective dose
IARC	International agency for research on cancer
JECFA	Joint FAO/WHO expert committee on food additives
LD	Lethal dose
LED	Lower effective dose
LOD	Limit of detection
LOQ	Limit of quantitation
MOE	Margin of exposure
NOAEL	No observed adverse effect level
PTWI	Provisional tolerable weekly intake
T25	Dose that induces a tumour incidence of 25% upon life time exposure
WHO	World health organization

I. 서론

아크릴아마이드(Acrylamide, CAS No. 79-06-1)는 공업적 용도로 사용되는 폴리아크릴아마이드 합성에 쓰이는 단량체이다. 역학연구와 동물실험에서, 아크릴아마이드는 신경독성을 나타내는 것으로 확인되었다. 또한 사람에 대한 역학 자료는 부족하지만, 동물실험에서 암을 유발했다는 연구결과를 통해 국제암연구소에서는 아크릴아마이드를 Group 2A, 인체발암추정물질(probable human carcinogen)로 분류하고 있다(IARC, 1994).

2002년, 스웨덴에서 처음 발표한 일반 식품 내 아크릴아마이드 존재 가능성은 인간 건강에 끼칠 수 있는 유해성 논란을 야기하였다(Ahn *et al.*, 2002; Svensson *et al.*, 2003). 식품 내 아크릴아마이드의 주요생성기전은 환원성 있는 당류와 아스파라긴의 Maillard 반응이다(Becalski *et al.*, 2003; Mottram *et al.*, 2002; Stadler *et al.*, 2002; Zyzak *et al.*, 2003). 아크릴아마이드는 고 탄수화물 식품의 가열 조리 시 발생 정도가 높으며, 감자 제품과 곡물 제품 등 오랜 기간 지속적으로 섭취하고 있는 식품에서의 발생 때문에 우려를 낳고 있다.

아크릴아마이드의 함량이 높은 식품의 섭취량이 큰 경우, 그로 인한 위해는 커질 수 있다. 식품 내 아크릴아마이드의 존재 가능성 확인 이후, 여러 국가에서는 자국에서 유통되는 식품에 대한 모니터링을 실시하고 있으며, 아크릴아마이드에 의한 노출량을 파악하고 있다. 스웨덴에서는 모니터링 조사를 통해, 감자칩과 감자튀김에서 아크릴아마이드 함량이 높음을 확인하였으며, 평균 체중을 70 kg으로 고려하였을 때, 스웨덴 국민의 아크릴아마이드 노출량은 $0.5 \mu\text{g/kg bw/day}$ 라고 보고하였다(Svensson *et al.*, 2003).

최근, WHO(2005)는 식이를 통한 오염물질을 평가하는 한가지 방법으로 총 식이조사를 제안하고 있다. 총 식이조사 방법은 일반적으로 소비되는 식품의 선정, 소매단위 마켓에서의 식품 구입, composite 형태로 만든 후 섭취 상태로 조리하는 과정을 포함한다. 오염물질 분석은 준비된 시료를 균질화 한 후 진행된다. 이러한 접근은 섭취되는 상태의 식품을 분석함으로써 국민의 식생활을 반영하여 오염물질의 노출량을 평가할 수 있다는 점에서 기존의 평가 방식과는 차별성을 가진다. 국외 food agency 중 미국의 FDA (Food and Drug Administration), 프랑스의 ANSES (French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety), 영국의 FSA (Food Standards Agency)는 총 식이조사를 이용한 아크릴아마이드 분석을

시행하였고 그 결과를 공개하고 있다.

한국에서는 식품의약품안전청의 관리 하에 지속적으로 아크릴아마이드의 모니터링을 시행해 왔지만, 체계적인 자료는 여전히 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구의 목적은 총 식이조사 방법을 사용하여 한국인의 아크릴아마이드 식이 노출량을 산출하는 것이다. 또한 2010 국민건강영양조사 자료를 토대로 연령에 따른 노출량 분포를 확인하였으며, 아크릴아마이드 노출에 대한 기여 식품을 비교하였다. 식이를 통해 노출되는 아크릴아마이드의 위해도는 MOE와 초과발암위해도를 이용하여 평가하였다.

II. 문헌고찰

아크릴아마이드는 정수 시설이나 폐수 처리 시설의 응집제, 접합제, 도료, 전기영동을 위한 크로마토그래피의 겔 등 공업적인 용도로 사용되는 폴리아크릴아마이드 합성에 사용되는 단량체이다. 아크릴아마이드는 분자량이 71.08 g/mol 이며, 백색 무취의 결정성 고체이다. 융점은 84.5℃, 비점은 87℃(2 mmHg)이며, 비중 1.122 g/cm(30℃)의 분자식 C_3H_5NO 화합물로 IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)에서는 2-propenamide로 명명한다. 아크릴아마이드는 물, 에탄올, 메탄올, 아세톤 등 극성 용매에는 잘 용해되는 한편, 벤젠, 헵텐과 같은 비극성 용매에는 잘 용해되지 않는 특성을 지닌다(IPCS, 1985).

2002년, 스웨덴의 SNFA (Swedish National Food Administration)와 Stockholm 대학교에서는 감자튀김, 감자칩 등 고온 조리한 식품에서 아크릴아마이드의 존재를 확인하였다(SNFA, 2002; Tareke *et al.*, 2002). 스웨덴 연구팀은 튀긴 식이로 자란 랫드의 경우 대조군에 비해 아크릴아마이드의 헤모글로빈(Hb) adduct인 N-(2-carbamoyl-ethyl)valine 수치가 유의적으로 높다는 연구 결과를 통해, Hb-adduct 수치 증가의 원인이 가열 조리한 식품이 될 수 있음을

보고하였다(Tareke *et al.*, 2000; 2002). 이후 영국, 노르웨이, 스위스, 미국, 캐나다 등에서 자국 내 식품의 아크릴아마이드 검출을 발표하면서 식품 내 아크릴아마이드에 대한 관심은 높아졌다.

식품에서의 아크릴아마이드 주요 생성 기전은 환원성 있는 당류와 아스파라긴 사이의 Maillard 반응이다(Zyzak *et al.*, 2003). Maillard 반응은 가열 조리된 식품의 색, 향미, 영양가의 변화를 초래하는 것으로 알려져 있으며, 이 반응에서 유리된 아스파라긴의 아미노기($-NH_2$)는 카르보닐기($-CO$)의 존재 하에 Schiff base를 생성한다. 가열 조건에서 Schiff base는 두 가지 경로로 진행될 수 있는데, 탈탄산 과정을 거쳐 바로 아크릴아마이드를 생성하거나, 가수분해되어 3-aminopropionamide를 형성한 후 암모니아가 제거되어 아크릴아마이드를 생성한다(Figure 1). 대부분의 식품은 환원당과 아미노 화합물을 함유하고 있으므로 식품 가공 시 Maillard 반응이 자연적으로 발생할 수 있으나, 특히 아스파라긴의 함량이 높은 감자의 경우 Maillard 반응을 통한 아크릴아마이드 생성량이 높은 것으로 알려져 있다(Becalski *et al.*, 2003). 아크릴아마이드는 감자칩, 프렌치프라이, 비스킷, 빵, 시리얼, 커피 등의 고탄수화물 식품에 고농도로 존재하는 반면, 육류와 같은 동물성 식품에서는 적은 양으로 발견된다(Lineback *et al.*, 2012).

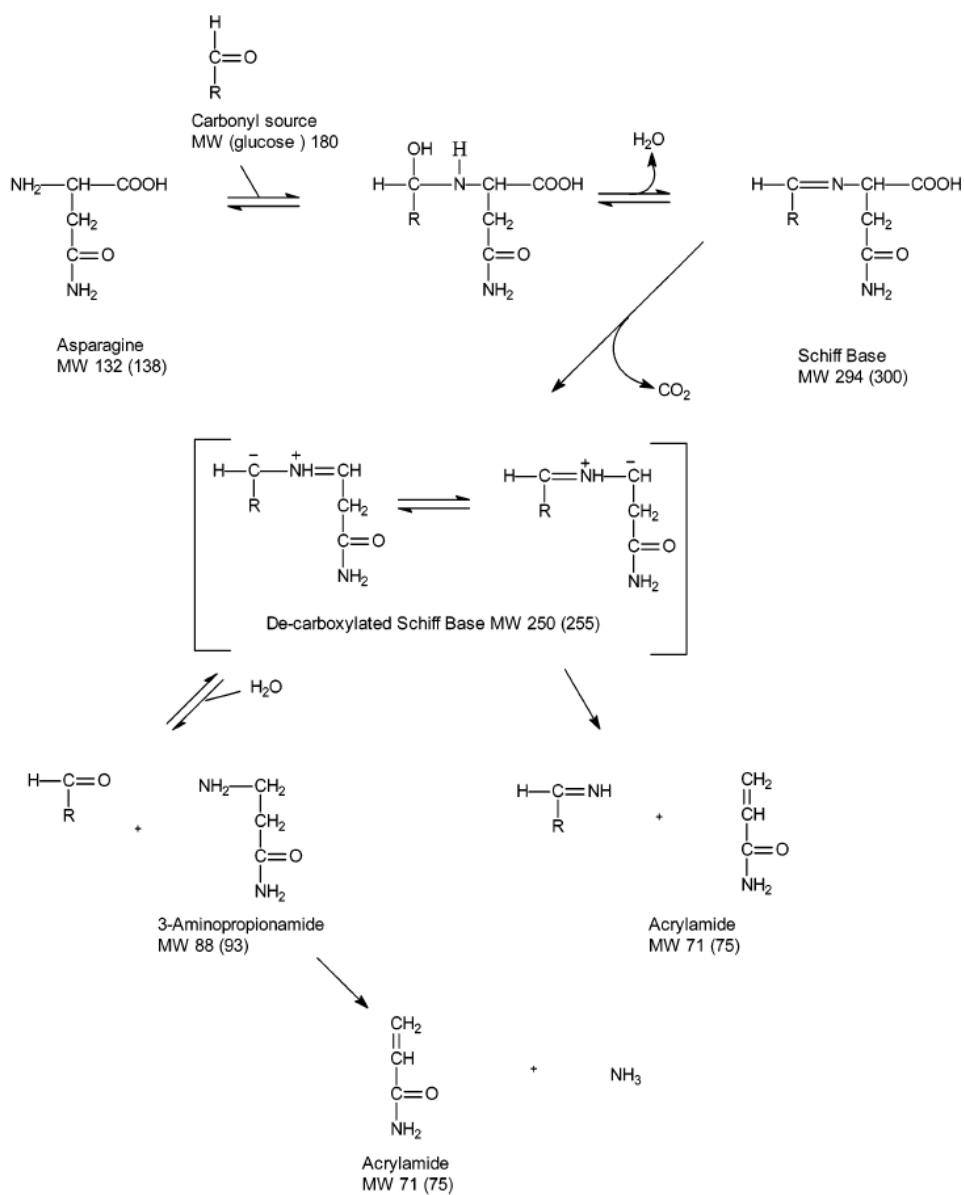


Figure 1. Mechanism of acrylamide formation in heated foods (Zyzak *et al.*, 2003)

조리과정 중 생성되는 아크릴아마이드는 여러 가지 조리 조건에 의해 영향을 받을 수 있다. 먼저, Tareke 등은 소고기, 닭고기와 같은 단백질이 풍부한 식품보다 감자, 비트와 같이 탄수화물이 풍부한 식품에서 아크릴아마이드 함량이 높음을 보고하여 아크릴아마이드 생성이 식품 구성에 의해 영향을 받을 수 있음을 밝혔다(Tareke *et al.*, 2002).

Becalski 등은 건조 조건에서 포도당과 아스파라긴 동량을 165℃, 185℃로 가열한 실험을 통해 시간 요인에 의한 아크릴아마이드 생성량 차이를 보고하였다. 가열 10분에서 아크릴아마이드는 최대 생성량을 보였으며, 20분 이상 조리 시 생성량은 감소하였다(Becalski *et al.*, 2003).

온도에 의한 아크릴아마이드 생성량의 차이를 확인하기 위해 Mottram 등은 동량의 아스파라긴과 포도당을 가열하여 Maillard 반응을 관찰하였다(Mottram *et al.*, 2002). 그 결과 아크릴아마이드는 120℃ 이상의 온도에서 형성되기 시작하여, 160–180℃에서 가장 많은 생성량을 보였고, 200℃ 이상의 온도 조건에서는 생성량이 감소하였다. Bråthen과 Knutsen은 아스파라긴과 포도당을 사용한 실험에서, 조리 온도와 시간을 다르게 한 모델을 통해 180–200℃에서 아크릴아마이드

생성량이 최대였으며 그 이상의 온도에서는 아크릴아마이드가 감소하는 경향을 확인하였고, 15분 이상의 조리온도에서 역시 아크릴아마이드가 감소하는 것을 보고하여 Becalski 등과 Mottram 등의 결과를 다시 한번 확인하였다(Becalski *et al.*, 2003; Bråthen & Knutsen, 2005; Mottram *et al.*, 2002). 그러나 오븐 온도가 높아질수록(120℃-220℃) 감자튀김의 아크릴아마이드 검출량이 증가했음을 보고한 Tareke 등의 연구결과와 비교하면 아크릴아마이드 생성은 온도뿐 아니라 조리 식품 내 수분함량에 따라서도 영향 받을 수 있다고 추측할 수 있다. Flat-bread를 이용한 연구에서, 수분함량이 4% 이하인 경우에만 아크릴아마이드 함량이 증가되었다는 결과를 보면, 식품 내 수분 보유 시 실질적으로 아크릴아마이드 생성에 영향을 미치는 온도는 낮아질 수 있음을 예상할 수 있다(Becalski *et al.*, 2003).

조리과정 중 아크릴아마이드 생성은 식품의 부피와 표면적 비율(surface-to-volume)에 의해 영향 받을 수 있다. 부피에 비해 표면적이 작은 경우, 아크릴아마이드 생성에 중요한 역할을 하는 열 전달이 불충분 할 수 있으므로 표면적이 큰 경우보다 아크릴아마이드 생성량이 감소한다(Taubert *et al.*, 2004).

이 외에도 낮은 pH에서 아크릴아마이드 생성량이 감소한

연구결과와 조리과정에서 기름 사용시 아크릴아마이드 생성량이 증가된 연구결과를 통해, pH에 의한 영향과 조리 시 기름 사용 여부에 의한 영향을 확인할 수 있다(Jung *et al.*, 2006; Mestdag *et al.*, 2005).

아크릴아마이드는 경구를 통해 배출되는 경우 빠르게 흡수된다. 동물실험결과, 식수를 통한 아크릴아마이드 투여 시 체내 이용률은 50-75% 정도로 관찰되었다(Barber *et al.*, 2001). 성인 남성을 대상으로 진행한 실험에서, 아크릴아마이드를 3 mg/kg로 섭취한 그룹의 경우 24시간 이내에 소변을 통해 40% 정도의 아크릴아마이드 대사체가 회수되었다(Fennell *et al.*, 2005). 회수된 대사체의 86% 정도는 GSH conjugation으로 인한 대사체였다. 이러한 결과는 섭취된 아크릴아마이드가 체내에서 빠르게 흡수됨을 의미한다.

동물에게 경구투여 된 아크릴아마이드는 여러 조직에 넓게 분포하는 특성을 보였으며, 적혈구와 후기 정자세포에서 높은 농도로 관찰되었다(Kadry *et al.*, 1999). 또한 정맥주사를 통해 어미 쥐에게 공급된 아크릴아마이드는, 태반을 빠르게 통과하여 임신한 어미 쥐와 태자에 비슷한 양상으로 분포한다는 연구 결과가 있다(Ikeda *et al.*, 1985; Ikeda *et al.*, 1983).

체내로 흡수된 아크릴아마이드는 빠르게 glutathione과 반응하여 glutathione conjugate를 형성한다. Glutathione에 의한 대사체는 N-acetyl-S-(3-amino-3-oxopropyl)cysteine 혹은 S-(3-amino-3-oxopropyl)cysteine으로, 이는 아크릴아마이드가 대사되고 해독되는 주요 경로이다. 이 외에 아크릴아마이드는 CYP2E1에 의해 대사 될 수 있는데, 이때 생성되는 glycidamide는 DNA adduct을 형성하는 유전독성의 주요 원인이다(Figure 2).

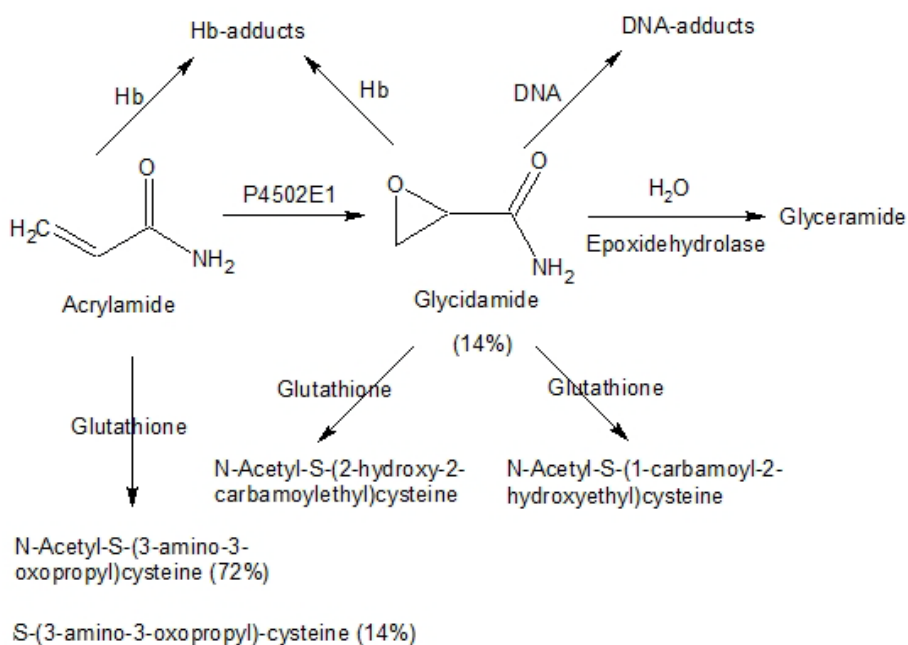


Figure 2. Metabolism of acrylamide in human

The schematic metabolic pathways are shown: inactivation by conjugation with glutathione (detoxification) and oxidative biotransformation by CYP2E1. The percentages given in *italics* correspond to the proportion after oral ingestion of acrylamide in humans (Kütting *et al.*, 2009).

아크릴아마이드와 그 대사체들은 소변을 통해 배설된다. 6명 지원자의 72시간 소변 회수를 진행한 Furh 등의 연구 결과, 소변에서 대사되지 않은 아크릴아마이드의 형태가 4%, N-acetyl-S-(2-carbamoyl-ethyl)cysteine이 50%, N-acetyl-S-(2-hydroxy-ethyl)cysteine이 10%의 비율로 관찰되었다(Fuhr *et al.*, 2006). 추정되는 체내 반감기는 아크릴아마이드의 경우 2.4시간, N-acetyl-S-(2-carbamoyl-ethyl)cysteine는 17.4시간, N-acetyl-S-(2-hydroxy-ethyl)cysteine는 25.1시간이었다. 랫드를 이용한 동물실험결과, 아크릴아마이드와 대사체의 60%가 24시간 이내에 소변으로 배설 되었다. 소변을 통한 아크릴아마이드의 배설 반감기는 7.8 시간이었다(Miller *et al.*, 1982).

아크릴아마이드의 급성독성 시험은 여러 실험동물 중에서 수행되었는데 랫드, 기니피그, 토끼의 LD₅₀은 150-180 mg/kg bw으로 나타났다(Mccollister *et al.*, 1964).

아크릴아마이드의 신경독성은 직업적으로 노출된 스웨덴의 터널 근로자로부터 밝혀졌다. 아크릴아마이드에 노출된 210명의 근로자 중 163명의 Hb-adduct 수치는 정상범위를 벗어났으며, 이 중 50명은 말초신경장애 증상을 보였다(Hagmar *et al.*, 2001). 아크릴아마이드의

직업적 노출로 인한 문제는 중국에서도 확인되었는데, 아크릴아마이드에 노출된 71명의 근로자 중, 52명이 반사작용과 감각의 손실, 손과 발의 마비 증상을 호소하였다(He *et al.*, 1989). 동물실험 결과에서 역시 아크릴아마이드는 말초신경병증을 나타냈다(Tyl *et al.*, 2000). Burek 등은 Fisher 344 랫드를 통한 동물실험에서 90일간 식수로 아크릴아마이드를 공급하였을 시, 신경독성을 나타내지 않는 농도로 0.2 mg/kg bw/day을 보고하였다(Burek *et al.*, 1980). 이 연구결과를 토대로 64차 JECFA위원회에서는 비발암성 종말점인 신경학적 형태변화에 대해 NOAEL(no observed adverse level)을 0.2 mg/kg bw/day으로 설정하였다.

아크릴아마이드의 인체 발암 자료는 불충분하지만, 동물실험에서 아크릴아마이드가 암을 유발시킨다는 사실은 여러 차례 보고되었다. 식수를 통해 2년간 만성적으로 아크릴아마이드를 노출시켰을 때, 랫드의 유방, 자궁, 부신, 갑상선, 고환 등에서 종양이 발생하였다. 또한 아크릴아마이드가 DNA에 심각한 손상을 주며 이는 유전된다는 연구결과가 있다(Friedman *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 1986). 따라서 IARC는 아크릴아마이드를 인체발암추정물질, Group 2A로 분류하고 있다. JECFA (2011) 위원회는 NCTR/NTP (National center for toxicological research/national toxicology program)에서 진행한

랫드와 마우스의 결과를 토대로 각각 두 가지의 $BMDL_{10}$ (95% the lower confidence limit on the benchmark dose for 10% extra risk of tumours)를 산출하였다. 첫 번째는 식수를 통해 2년간 아크릴아마이드를 노출한 F344 랫드 연구결과에서 유선종양을 유발한 0.31 mg/kg bw/day (Table 1), 두 번째는 B6C3F1 마우스의 하더리안선 종양을 유발한 용량인 0.18 mg/kg bw/day이다 (Table 2). 아크릴아마이드로 인한 암 발생은 마우스의 하더리안선에서 가장 낮은 농도로 유발되었다. 사람의 경우 마우스의 연구 결과와 동일한 기관이 존재하지 않지만, 아크릴아마이드에 의한 암 발생이 표적 장기가 아닌 여러 조직에서 진행되었다는 선행연구를 고려한다면 (Johnson *et al.*, 1986), 하더리안선에서의 발암 결과를 무시할 수 없다. 두 가지 $BMDL_{10}$ 값은 모두 U.S. EPA에서 제공하고 있는 BMD software (BMD version 2.0) 통계 모델을 사용하여 산출되었다.

Table 1. Summary of results of dose-response modeling for induction of selected tumours in rats given drinking-water containing acrylamide (JECFA, 2011)

Species	Sex	Neoplasm	BMDL ₁₀ (mg/kg bw/day)
F344 rats	Male	Testicular mesothelioma	1.25–1.73
		Heart malignant schwannoma	1.29–1.92
		Pancreatic islet adenoma	1.60–2.20
		Pancreatic islet adenoma or carcinoma	1.46–2.01
		Thyroid gland follicular cell carcinoma	1.11–1.83
		Thyroid gland follicular cell adenoma or carcinoma	2.31–2.54
F344 rats	Female	Clitoral gland carcinoma	1.55–3.11
		Mammary gland fibroadenoma	0.31–0.87
		Mammary gland fibroadenoma or adenocarcinoma	0.33–0.90

Table 2. Summary of results of dose-response modeling for induction of selected tumours in mice given drinking-water containing acrylamide (JECFA, 2011)

Species	Sex	Neoplasm	BMDL ₁₀ (mg/kg bw/day)
B6C3F1 mice	Male	Harderian gland adenoma	0.18–0.56
		Harderian gland adenoma or carcinoma	0.18–0.55
		Lung alveolar/bronchiolar adenoma	1.29–2.84
		Lung alveolar/bronchiolar adenoma or carcinoma	1.28–2.78
		Forestomach squamous cell papilloma	3.18–6.02
		Forestomach squamous cell papilloma or carcinoma	2.68–5.36
B6C3F1 mice	Female	Harderian gland adenoma	0.31–0.53
		Lung alveolar/bronchiolar adenoma	1.29–2.84
		Lung alveolar/bronchiolar adenoma or carcinoma	1.28–2.78
		Mammary gland adenocarcinoma	1.19–3.41
		Mammary gland adenoacanthoma	6.39–8.19
		Mammary gland adenocarcinoma or adenoacanthoma	2.06–5.22
		Ovarian benign granulosa cell tumour	6.51–7.83

아크릴아마이드의 또 다른 용량 반응 평가는 Dybing과 Sanner에 의해 수행되었다(Dybing & Sanner, 2003). Dybing과 Sanner는 Johnson 등의 연구결과에서 가장 민감한 결과를 보인 랫드의 유선종양 발생에 대한 LED₁₀ (lower effective dose)과 T25를 이용하여 CSF (q₁^{*})를 산출하였다(Dybing & Sanner, 2003; Johnson *et al.*, 1986). LED₁₀은 10%의 반응을 나타내는 용량의 95% 신뢰구간 하한치로 BMDL₁₀과 동일한 의미이며, T25는 25% 종양발생 용량을 의미한다. 각 수치는 10⁻⁵의 위해수준으로 환산된 후, EPA (1996)에서 제안한 human conversion factor인 4.1을 반영하여 HLED¹와 HT² 산출에 이용되었다. 두 결과의 평균 값인 1.3 (mg/kg bw/day)⁻¹은 아크릴아마이드의 CSF로 제안되었다(Table 3).

EPA(2010)에서는 Johnson 등의 연구결과에서 수컷 랫드의 갑상선 종양과 고환 초막 증피종을 포괄하는 종말점에 대해 0.5 (mg/kg bw/day)⁻¹을 CSF로 정하였다.

¹ HLED: Human equivalent LED

² HT: Human equivalent dose for T25

Table 3. Lifetime cancer hazard after exposure to acrylamide in humans (Dybing & Sanner, 2003)

Model	Lifetime exposure dose which represents a cancer hazard of 10^{-5}	Lifetime hazard after lifelong exposure (1 $\mu\text{g/kg bw/day}$)
LED ₁₀ =0.40 mg/kg bw/day		
LED 10^{-5} =0.040 $\mu\text{g/kg bw/day}$	0.0098 $\mu\text{g/kg bw/day}$	$1.0 * 10^{-3}$
HLED 10^{-5} is estimated by dividing by 4.1		
T25=0.64 mg/kg bw/day		
T 10^{-5} =0.0256 $\mu\text{g/kg bw/day}$	0.0062 $\mu\text{g/kg bw/day}$	$1.6 * 10^{-3}$
HT 10^{-5} is estimated by dividing by 4.1		

LED₁₀: the lower 95% confidence limit for the dose giving the animals an increased tumour incidence of 10%,
calculated with the multistage model

T25: dose that increases the tumour incidence by 25% under standard conditions

여러 다른 국가에서는 식이를 통한 아크릴아마이드의 노출량을 산출하고 그 결과를 공개하고 있다. 식품에서 아크릴아마이드 검출을 처음 발표한 스웨덴에서는 1인 1일 노출량이 $35 \mu\text{g/day}$ 정도이며, 체중을 70 kg 으로 고려하였을 시 단위체중당 노출량은 $0.5 \mu\text{g/kg bw/day}$ 라고 보고하였다(Svensson *et al.*, 2003). Konings 등의 연구 결과, 1998년 식이 섭취 조사자료의 섭취량 자료를 이용한 네덜란드인의 아크릴아마이드 평균 노출량은 $0.48 \mu\text{g/kg bw/day}$ 이었으며, 1세부터 6세 어린이의 아크릴아마이드 노출량은 $1.04 \mu\text{g/kg bw/day}$ 으로, 총 인구(1세-97세)를 대상으로 산출한 노출량보다 두배 이상 높게 나타났다(Konings *et al.*, 2003). 64차 JECFA 위원회는 17개 국가의 식이 섭취량 자료와, 각 국가별 아크릴아마이드 평균값을 이용하여 아크릴아마이드 노출량을 보수적인 방법으로 산출한 결과, 일반 섭취군의 경우 $1 \mu\text{g/kg bw/day}$, 고 섭취군의 경우 $4 \mu\text{g/kg bw/day}$ 의 아크릴아마이드에 만성적으로 노출되고 있다고 보고하였다(JECFA, 2005). 프랑스에서 13-18세의 청소년을 대상으로 노출량을 산출한 결과, 대상자의 50th 퍼센타일에 해당하는 노출량은 $0.51 \mu\text{g/kg bw/day}$ 수준이었다(Matthys *et al.*, 2005). 중국인의 경우, 식이를 통한 평균 노출량은 $0.38 \mu\text{g/kg bw/day}$, 95th 퍼센타일의 노출량은 $1.27 \mu\text{g/kg bw/day}$ 정도이다(Chen *et al.*, 2008). Claeys 등은 벨기에인의 아크릴아마이드 평균 노출량이 $0.35 \mu\text{g/kg bw/day}$ 이며 50th 퍼센타일의 경우 $0.2 \mu\text{g/kg bw/day}$ 라고

보고하였다(Claeys *et al.*, 2010).

2005년 WHO에서 국가 수준의 오염물질 평가를 위해 총 식이조사(total diet study)를 제안한 이후, 미국, 영국, 호주, 프랑스, 캐나다, 중국, 일본 등 여러 국가에서는 총 식이조사를 시행하고 있다. 총 식이조사는 섭취되는 상태의 식품을 분석함으로써 국민의 식이 노출량을 평가하는 한 방식이다. 이것은 식품 섭취량 혹은 식품 수급표 등의 자료를 이용하여 분석 대상 식품을 선정하고, 전국에서 식품을 수집하여, 섭취 상태로 조리하는 과정을 거친 후, 분석을 진행하여 노출량을 산출하는 방식으로 진행된다(WHO, 2005). 독성을 가지는 유해물질 혹은 특정 영양소에 대해 국민의 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 수준으로 섭취되고 있는 지를 평가하는 총 식이조사는, 국민의 식생활이 안전한 지를 확인하기 위해 필수적이다.

총 식이조사는 기존의 모니터링 연구와는 몇 가지 차이점을 보인다(FAO, 2012). 먼저, 식품 내 존재하는 유해물질 농도 규제에 목적을 두는 기존의 평가 방법과는 달리 노출량 산출을 통한 위해 평가를 목적으로 한다. 산출된 노출량은 ADI 또는 PTWI와 같은 독성학적 참고치와 비교되어 평가된다. 두 번째로, 식품 각각에 대해 분석을 진행하는 기존 모니터링과는 달리 식품 별로 composite을 만들어 분석을 진행한다. 따라서 분석 시료수의 감소를 통하여, 총

식이조사는 비용대비 효과적인 방법으로 제안되고 있다. 마지막으로 총 식이조사에서는 개별 식품이 아닌 식이에 초점을 둔다. 따라서 분석에 사용되는 식품은 집에서 소비되는 형태로 조리되며, 이것은 조리 중 파괴되거나 생성되는 유해물질을 반영할 수 있는 장점을 가진다.

이와 같이 총 식이조사는 실제 섭취량에 가장 근접한 오염도를 산출하는 데 도움을 준다. 미국, 영국, 프랑스에서는 총 식이조사를 이용한 아크릴아마이드 분석 결과를 공개하고 있다. 2005년의 FSA 보고서에 따르면, 영국의 총 식이조사에서는 총 480종개의 시료를 20개의 식품그룹으로 분류 한 후 분석을 진행한 결과, 7개의 식품 그룹에서 아크릴아마이드가 검출되었음을 확인하였다. 영국인의 식이에서 가장 큰 기여를 나타낸 식품은 시리얼 제품과 감자였다(FSA, 2005). 미국에서는 2003년부터 2006년까지 4년간 총 식이조사 방법을 이용한 아크릴아마이드 분석을 진행하였으며, 이를 토대로 2세 이상 국민의 노출량이 $0.4 \mu\text{g/kg bw/day}$ 임을 발표하였다(FDA, 2006). 프랑스의 총 식이조사에서 192개의 시료를 분석한 결과, 볶은 감자/감자 튀김이 성인(45%)과 어린이(61%)의 아크릴아마이드 노출에 가장 크게 기여하였다. 프랑스인들의 아크릴아마이드 노출량은 성인의 경우 $0.43 \mu\text{g/kg bw/day}$, 어린이의 경우 $1.80 \mu\text{g/kg bw/day}$ 으로 나타났다(ANSES, 2011).

아크릴아마이드 노출에 따른 위해도를 결정하기 위해 위해평가가 진행되어왔다. 아크릴아마이드의 신경학적 변화에 대한 NOAEL (0.2 mg/kg bw/day)을 이용한 평가에서, JECFA(2005)는 일반 섭취군의 노출량(1 μ g/kg bw/day)에 대해 MOE를 200으로 산출하였다. 비발암성 독성종말점에 대한 MOE는 100 이상의 값을 가지면 안전력에 있다고 판단하므로, 이 경우 아크릴아마이드 노출에 의한 신경독성은 안전한 수준으로 사료된다.

발암물질의 경우 일반적으로 MOE를 이용한 평가 혹은 CSF (q_1^*)를 이용한 평가가 수행된다. MOE에 대한 평가는 BMD와 같은 독성 참고치를 노출되는 양으로 나누어 산출한다. JECFA(2005)는 일반 섭취군(1 μ g/kg bw/day)의 경우, 유선종양에 대한 MOE가 310이고, 하더리안선에 대한 MOE가 180 라고 보고하였다. 평가된 MOE는 다른 유해물질의 MOE값과 비교하여 관리의 우선순위를 정하는 데 사용할 수 있다.

초과발암위해도는 노출량(mg/kg bw/day)과 q_1^* (mg/kg bw/day)⁻¹의 곱으로 산출한다. 산출된 초과발암위해도는 일반적으로 10⁻⁵ 수준이면 합리적인 수준으로 허용된다(WHO, 1996). Dybing과 Sanner는 Johnson 등의 연구 결과 에서 가장 민감한 결과를 보인 유선종양에 대해 multistage model을 이용하여 CSF (q_1^*)를 1.3 (mg/kg bw/day)⁻¹

로 정하였다(Dybing & Sanner, 2003; Johnson *et al.*, 1986). 또한 산출한 CSF로 노르웨이인의 아크릴아마이드 노출량($0.49 \mu\text{g/kg bw/day}$)을 평가한 결과, 인구 10^4 당 6명이 초과적으로 아크릴아마이드에 의해 암이 발생한다는 결과를 보고하였다(Dybing & Sanner, 2003). 이러한 결과는 아크릴아마이드에 의한 발암 위험도가 무시할 수 없는 수준임을 의미한다.

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 시약 및 기기

Acrylamide (analytical standards)와 내부표준물질인 $^{13}\text{C}_3$ -acrylamide는 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 표준 원액 조제에 사용한 methanol (HPLC grade)은 Samchun pure chemical (Gyeonggi, Korea)에서, formic acid는 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 실험의 정확성 검증을 위해 사용한 인증표준물질인 ERM-BD-272 (chrispbread, produced by BAM), ERM-BD-273 (toasted bread, produced by IRMM), ERM-BD274 (rusk, produced by BAM)는 LGC standards (Wesel, Germany)에서 제공받았으며, CRM #108-10-003 (아크릴아마이드 분석용 감자칩 인증표준물질)은 한국표준과학연구원 (KRISS, Daejeon, Korea)에서 구입하였다. 실험에 사용된 모든 수용액은 de-ionized water (Water purification system, YL Instrument Co., Ltd., Gyeonggi, Korea)를 이용하였다.

시료의 전처리 과정에서 진탕기(SI-600R, Lab companion, Jeio tech, Seoul, Korea)와 원심분리기(KR/Mega21R, Hanil science industrial Co., Ltd, Seoul, Korea)를 사용하였으며 분석에는 Unison

UK-C18 column (100 mm*2mm i.d., 3 μ m particle size; Imtakt, Kyoto, Japan)이 연결된 Dionex Ultimate 3000 (Sunnyvale, CA, USA)를 이용, LTQ-Orbitrap hybrid mass spectrometer (Thermo-Finnigan, CA, USA)로 정량을 진행하였다. 실험에 사용된 여과튜브는 Chrom tech, Inc. (Minnesota, USA)의 Maxi-Spin filter (0.45 μ m PVDF)이다. Oasis HLB cartridge (충진제: lipophilic divinylbenzene and hydrophilic N-vinylpyrrolidone, 200 mg, 용량: 6 ml)는 Waters corporation (MA, USA)에서, Bond Elut AccuCAT (충진제: Sulfonic acid and quaternary amine silica based, 200 mg, 용량: 3 ml)은 Agilent (CA, USA)에서 각각 구입하였다.

2. 시료 준비

총 식이조사 수행을 위한 아크릴아마이드 분석 시료는 한국보건산업진흥원으로부터 제공받았다. 한국보건산업진흥원에서 수행한 식품의 선정에서 조리까지의 전처리 단계는 다음의 방법으로 진행되었다.

시료 선정은 국민건강영양조사(2008-2010)의 식품섭취량 자료에 등장한 식품을 대상으로 하였다. 우리 국민이 많이 섭취하는 식품의 반영을 위해 식품을 식품 별 1인 1일 평균 섭취량으로 정렬한 후, 식품 별 섭취량 누적비율이 90%까지 포함되는 식품을 다소비 식품으로 선정하였다. 또한 우리 국민이 자주 섭취하는 식품을 고려하기 위해 식품 별 섭취자 수를 구한 후, 섭취자 비율이 5% 이상에 포함되는 식품을 다빈도 식품으로 선정하였다. 선정된 식품에서 성상이 비슷한 식품과 원재료가 거의 유사한 식품은 제외되었고, 선행 연구를 통해 아크릴아마이드가 고농도로 검출된 식품을 추가하여 185종의 시료를 선정하였으며, 총 식이조사의 전처리 과정에서 사용된 수돗물을 포함하여 최종 186개의 시료를 분석 대상 시료로 정하였다(Table 4).

각각의 식품은 인구 100만 이상의 대도시 10개 중, 인구 수를 고려하여 선정한 19개의 대형 마트에서 구입되었다. 구입된 시료는

시료 별 composite으로 만들어진 후, 식품명과 음식명을 매칭하여 총 식이조사를 위한 조리법에 따라 조리되었다. 식품에 따라 적용한 조리법은 보건산업진흥원의 식품 개별 상태로 조리하는 총 식이조사용 조리법 매뉴얼(출판 예정)에 따라 진행되었다. 각 시료는 균질과 과정을 거친 후 아크릴아마이드 분석 직전까지 초저온냉동고(-80℃)에 보관하였다.

Table 4. Foods selected for the acrylamide analysis based on consumption patterns in Korea

Food group	Food with no detectable level of acrylamide
Grains	Buckwheat noodles (boiled), Wheat flour (as purchased, griddled after kneaded, air fried after kneaded, oil fried after kneaded, roasted after kneaded, boiled after kneaded), Bread crumbs (as purchased, air fired, oil fried), Dry form noodles (as purchased, boiled, sautéed after boiled), Ramen (as purchased, boiled), Noodles (boiled), Bread (as purchased), Biscuits/cookies (as purchased), Snacks (as purchased), Bread/jam/red bean paste (as purchased), Rye bread (as purchased), Cakes (as purchased), Hamburgers (as purchased), Barley (boiled), parched/raw grain powder (as purchased), Sorghum (boiled), Rice cakes/red bean paste/Sirutteok (as purchased), Cereals (as purchased), Brown rice (boiled), Polished rice (boiled), Glutinous rice (boiled), Scorched rice (as purchased, boiled), Garaetteok/Baekseolgi (as purchased, boiled), Corn (raw, steamed, roasted), Popcorn (as purchased), Millet (boiled), Dumpling (as purchased, griddled), Instant cup noodles (as purchased, added boiling water)
Potatoes	Potato (raw, boiled, sautéed, roasted), Potato chip (as purchased), French fries (as purchased), Sweet potato (raw, steamed, roasted)
Sugars	Starch syrup (as purchased, sautéed)
Vegetables	Kimchi/Kkakduki (as purchased), Kimchi/Baechunkimchi (as purchased, boiled), Kimchi/Yeolmukimchi (as purchased), Kimchi/Chongkakkimchi (as purchased), Perilla leaves (raw, sautéed), Carrot (raw, sautéed), Garlic (raw, sautéed), Cabbage (raw, sautéed), Chinese chive (raw, griddled), Ginger (raw, sautéed), Onion (raw, sautéed), Welsh onion (raw, sautéed), Sweet pepper (raw, sautéed), Squash/pumpkin (raw, sautéed)
Mushrooms	Oyster mushroom (raw, sautéed), Oak mushroom (raw, sautéed),
Legumes	Soybean curd (as purchased, griddled), Soybean milk (as purchased)
Nuts	Perilla (as purchased, boiled), Peanuts (as purchased, boiled), Sesame (as purchased)
Sea vegetables	Laver (as purchased, roasted)
Fish	Hairtail (raw, griddled), Mackerel (raw, griddled), Pacific saury (raw, roasted), Dried anchovy (as purchased, sautéed), Eel (raw, roasted), Yellow croaker (raw, griddled), Fish paste (as purchased, boiled, sautéed), Oyster (raw, griddled), Small octopus/whole (raw, sautéed), Small

	octopus/edible part (raw, sautéed), Shrimp/whole (raw, sautéed), Shrimp/edible part (raw, sautéed), Squid (raw, sautéed)
Fats and oils	Butter (as purchased, sautéed, roasted), Olive oil (as purchased, sautéed, griddled), Sesame oil (as purchased, sautéed, boiled), Soybean oil (as purchased)
Dairy	Cheese (as purchased, roasted)
Meat	Chicken (raw, boiled, air fried), Pork (raw, boiled, sautéed, roasted), Pork belly (roasted), Pork products (as purchased, griddled, sautéed), Korean beef (raw, boiled, sautéed), Imported beef (raw, boiled, sautéed, roasted), Beef/edible viscera (raw, boiled, steamed, roasted), Beef-bone soup (as purchased, boiled), Duck (raw, boiled, roasted), Egg (raw, griddled, poached, boiled)
Beverages	Sake (as purchased, sautéed), Instant coffee (added water), Percolated coffee (as purchased), Canned coffee (as purchased)
Seasonings	Soy sauce (as purchased, boiled, sautéed), Gochujang (as purchased, sautéed), Seasoning powder (as purchased, boiled), Tomato Ketchup (as purchased, sautéed, roasted), Black pepper (as purchased, sautéed, air fried, roasted), Curry (as purchased, boiled after sautéed)
	Water (used in cooking)

3. 아크릴아마이드 분석

아크릴아마이드 분석 방법은 U.S. FDA에서 제안한 방법(FDA, 2003)과 Bråthen과 Knutsen의 방법(Bråthen & Knutsen, 2005)을 이용하여 확립하였다. 전처리 방법은 대부분의 식품 매트릭스에 적용이 가능하고 아크릴아마이드에 따른 선택성과 민감성이 높은 고체상 추출법을 적용하였다.

분석에 사용한 표준원액은 아크릴아마이드 표준품을 물에 녹여 1 mg/ml이 되도록 한 후 실험에 필요한 농도로 희석하여 사용하였다. 내부표준원액은 탄소13 동위원소($^{13}\text{C}_3$)로 치환된 아크릴아마이드를 메탄올에 녹여 1 mg/ml로 만들었고, 여기에 0.1% 개미산을 가해 200 mg/ml 농도의 내부표준용액을 만들어 사용하였다. 먼저 균질화된 시료(1 g)에 내부표준용액 1 ml와 물 9 ml를 가하여 진탕기에서 200 rpm으로 20분 동안 수용액상의 추출 과정을 거쳤다. 이 샘플을 9000 rpm으로 15분 동안 원심분리 한 후 분리된 물 층 5 ml은 Maxi-Spin filter tube에 옮기고 9000 rpm으로 4분간 다시 원심분리하여 여과하였다. 여과된 물 층에서 1.5 ml은 메탄올 3.5 ml와 물 3.5 ml로 활성화된 OASIS HLB cartridge에 통과시켰다. 용리액으로써 물 0.5 ml를 흘려버리고 물 1.5 ml를 추가적으로 통과시켜 용출된 부분을 모았다. 메탄올 2.5 ml와 물 2.5 ml로 활성화시킨 Bond Elut AccuCAT

cartridge에 용출액 1.5 ml를 넣은 후 처음 0.5 ml은 흘려버리고 이후 얻어진 1 ml만을 정량을 위한 액체크로마토그래프의 시험용액으로 하였다(Figure 3).

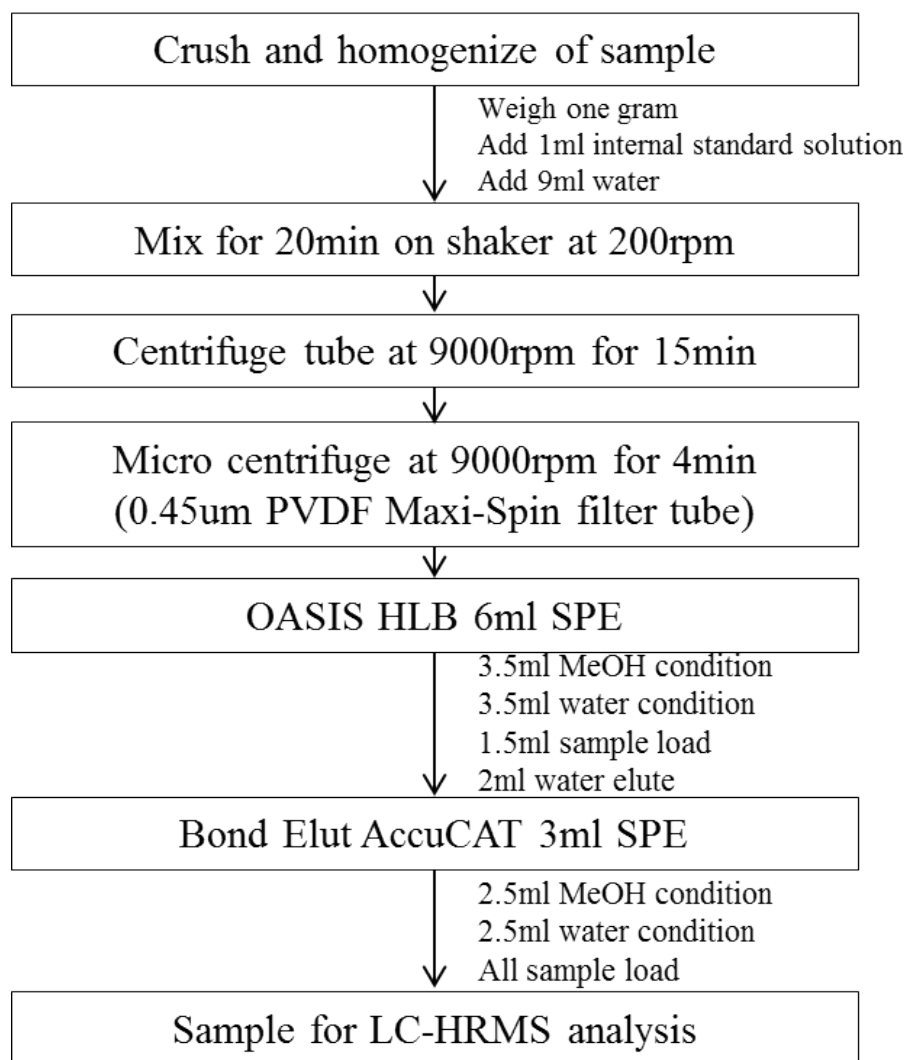


Figure 3. Scheme of acrylamide analysis

분석조건은 high performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry (HPLC-HRMS)을 통해 확립하였다. 시험용액 중 20 μl 는 Unison UK-C18 column가 연결된 Dionex Ultimate 3000에 주입되었다. 이동상으로 0.1% acetic acid와 0.5% methanol를 포함하는 수용액을 사용하였으며, 유속은 200 $\mu\text{l}/\text{min}$ 으로 하였다. 정량에는 LTQ-Orbitrap hybrid mass spectrometer 를 사용하였으며, 이온화 방식은 ESI (Electro Spray Ionization) positive mode를 이용하였다. Hybrid ion trap으로 아크릴아마이드 표준물질은 m/z 72.0446, 탄소 13 동위원소($^{13}\text{C}_3$)로 치환된 아크릴아마이드 내부표준물질은 m/z 75.0546를 선택하여 정량이온으로 사용하였다. 상세한 LC-HRMS의 조건은 아래 표와 같다(Table 5).

Table 5. Summary of LC-HRMS analytical conditions

Description	LC condition	Description	HRMS condition
Instrument	Dionex Ultimate 3000	Instrument	Thermo-Finnigan LTQ-Orbitrap
Column	Unison UK-C18 (100mm*2mm, 3 μ m)	Hybrid ion trap	Acrylamide : m/z 72.0446 ¹³ C ₃ -acrylamide : m/z 75.0546
Mobile phase	0.1% Acetic acid 0.5% MeOH in DW	Ionization	ESI positive mode
Flow rate (ml/min)	0.2	Sheath gas (N ₂) flow rate (arb)	20
Injection vol. (μ l)	20	Auxiliary gas (Ar) flow rate (arb)	5
Column temperature (°C)	25	Capillary temperature (°C)	340
		Capillary voltage (V)	37
		Ion spray voltage (kV)	5

4. 분석법 검증

식품의약품안전청에서 제안하는 의약품 등 분석법의 밸리데이션에 대한 가이드라인(2004)을 참고하여 분석법을 확립하였다. 본 연구에서는 분석법 검증을 위해 정량 범위 이내의 직선성(linearity) 및 검출한계(LOD), 정량한계(LOQ)를 확인하였으며, 탄소 13 동위원소($^{13}\text{C}_3$)로 치환된 아크릴아마이드를 내부표준물질로 첨가한 각각의 시료에 대하여 식품 별 아크릴아마이드 회수율(recovery)을 측정하였다. 추가적으로 인증표준물질(CRM)과의 비교를 통해 분석의 정확성(accuracy)을 평가하였고, 실험자간(inter-individual test) 및 일간 재현성(inter-day test)을 확인하였다.

4.1. 직선성

직선성이란 일정 범위에 있는 분석대상물질의 농도에 대하여 직선적인 측정값을 얻어낼 수 있는 능력이다. 본 실험에서는 6가지 농도(0-300 $\mu\text{g}/\text{kg}$)의 표준물질에 내부표준물질을 가한 시료로 검량선을 구성하였고, 추가적으로 아크릴아마이드를 고농도로 함유한 시료의 정량을 위해 넓은 범위(0-1000 $\mu\text{g}/\text{kg}$)의 검량곡선을 작성하여 농도에 따라 두 개의 검량 곡선을 적용하였다.

4.2. 검출한계 및 정량한계

검출한계를 산출하는 방법으로 시그널(signal) 대 노이즈(noise)에 근거하는 방법(S/N)을 이용하였다. 본 실험에서는 3 : 1의 시그널 대 노이즈 비에 근사한 분석대상물질의 최저 농도를 검출한계로, 10:1의 시그널 대 노이즈 비에 근사한 분석대상물질의 최저 농도를 정량한계로 정하였다.

4.3. 회수율

회수율은 시료에 아크릴아마이드 표준용액을 첨가한 후 정량하는 표준액첨가법을 사용하여 측정하였다. 먼저 식품 특성에 식품의 조직 특성을 반영하는 감자, 식품 복합체인 배추김치, 분말 형태의 밀가루, 수용액상의 커피, 유지류의 콩기름을 5종의 대표 식품으로 선정하였다, 각 시료에 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 의 아크릴아마이드 표준용액을 첨가한 후, 시료에서 검출된 아크릴아마이드와 첨가한 아크릴아마이드 농도의 비를 통해 회수율을 측정하였다.

4.4. 정확성

본 연구에서는 아크릴아마이드 분석법의 정확성을 확인하기 위해 KRISS(한국표준과학연구원), BAM(Federal Institute for Materials Research and Testing, Germany), IRMM(Institute for Reference Materials and Measurements)에 의해 공인된 인증 표준물질(Certified

reference material, CRM)을 사용하였다. 인증표준물질으로는 KRISS 108-10-003(아크릴아마이드 분석용 감자칩), ERM-BD272(Crispbread), ERM-BD273(Toasted bread), ERM-BD274(Rusk)의 4개의 CRM을 이용하였으며, 측정값의 정확도는 인증값과 비교를 통해 z-score 수치로 판단하였다.

4.5. 재현성

본 연구에서는 실험 수행자의 수행능력을 확인하기 위해 동일 실험실의 다른 실험자와 실험자간 재현성 확인(inter-individual test)을 진행하였다. 실험자간 재현성 확인에는 감자칩 시료를 대상으로 세가지의 농도(10, 25, 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$)의 표준물질을 첨가하여 분석을 진행하였다. 또한 일간 재현성(inter-day test)을 확인하기 위해, 같은 시료를 서로 다른 2일간 연속으로 분석하여 그 결과를 비교하였다.

5. 노출량 산출

아크릴아마이드의 노출량은 2010년도 국민건강영양조사를 토대로 산출하였다. 국민건강영양조사(2010) 자료에서, 분석한 식품에 해당하는 음식명을 모두 추출한 후, 추출된 음식명을 조리방법에 따라 분류하여 아크릴아마이드 분석 결과를 적용하였다(Appendix A). 음식의 조리방법은 한식, 중식, 양식 조리기능사에서 사용되는 조리방법 및 네이버에서 제공하는 전문 레시피 방법을 참고하였다. 아크릴아마이드에 대한 개인 노출량은 개인 식품섭취량 자료와 섭취한 식품 내 아크릴아마이드 함량의 곱으로 계산되었다. 아크릴아마이드 함량이 LOD 이상, LOQ 이하로 검출된 식품에 대해서는 1/2 LOQ값을 적용하였다. 섭취량 데이터의 표본(n=8019)에서 모집단으로의 적용을 위해 가중치를 고려하였으며, 노출량 산출을 위한 분석에는 SAS program (Statistical Analysis System version 9.3, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 사용하였다.

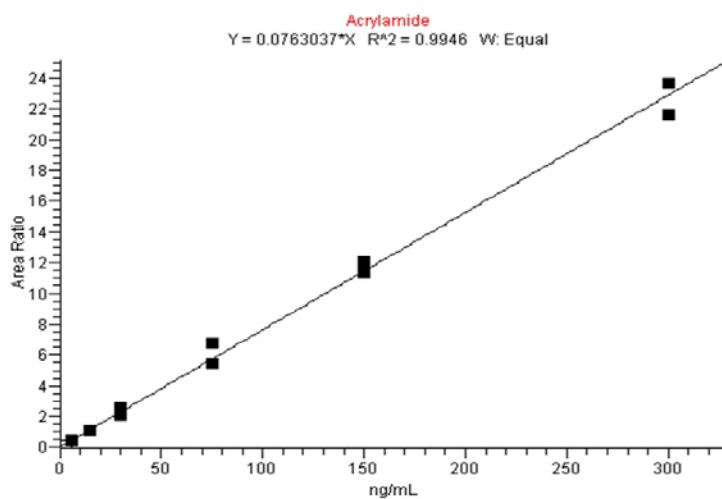
IV. 결과 및 고찰

1. 분석법 검증

1.1. 직선성

정량 범위 이내의 두 가지 농도범위에서 검량선을 작성한 결과, 0-300 $\mu\text{g/kg}$ 범위에서는 $y=0.0763037*x$ ($r^2=0.9946$), 0-1000 $\mu\text{g/kg}$ 의 넓은 범위에서는 $y=0.0573986*x$ ($r^2=0.9989$)의 검량선을 얻을 수 있었다. 이를 통해 실험을 진행한 농도범위에서 아크릴아마이드에 대한 기기의 정량적 반응을 확보하였다.

a)



b)

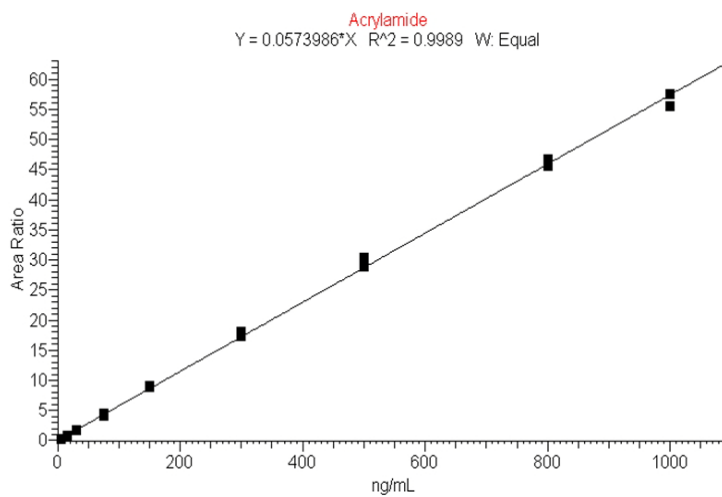


Figure 4. Standard curve of acrylamide with internal standard

a) Standard curve for low concentration range (0-300 $\mu\text{g/kg}$)

b) Standard curve for high concentration range (0-1000 $\mu\text{g/kg}$)

1.2. 검출한계 및 정량한계

시그널 대 노이즈 비에 근거하여 검출한계와 정량한계를 확인한 결과, 아크릴아마이드에 대한 기기의 검출한계는 2 ppb, 정량한계는 9 ppb로 나타났다. 식품의약품안전청에서 LC-MS/MS를 이용하여 수행한 아크릴아마이드 분석에서 검출한계가 1 ppb, 정량한계가 10 ppb이었음을 고려한다면(최동미, 2007), 본 실험의 분석조건은 미량의 아크릴아마이드의 정량에 적합한 수준으로 사료된다.

1.3. 회수율

표준액 첨가법을 이용하여 식품 특성에 따라 5종의 식품(감자, 배추김치, 밀가루, 액상 인스턴트커피, 콩기름)에 대해 회수율을 측정한 결과 Table 6에서 나타낸 바와 같이 91-104%의 회수율을 얻었다. 본 연구에서는 분말형태의 밀가루에서 가장 낮은 회수율이 관찰되었는데, 이것은 비스킷, 시리얼, 프렌치프라이, 빵, 쿠키, 카카오 분말을 이용한 회수율 시험에서 분말형태인 카카오 분말의 회수율이 가장 낮았던 Şenyuva와 Gökmen의 연구결과와 일치하였다. 보고된 카카오 분말의 회수율은 81.2%였다(Şenyuva & Gökmen, 2005). 반면, 식품 복합체인 김치에서는 100% 이상의 회수율이 측정되었는데, 이것은 복합체의 특성 상 다양한 방해물질의 존재로 인한 것으로 추정된다.

Table 6. Recovery of the spiked acrylamide from various sample matrixes ^a

Matrix	Mean recovery (%)
Potato	103
<i>Kimchi</i>	104
Wheat flour	91
Coffee	101
Soybean oil	96

^a A standard solution of acrylamide (100 $\mu\text{g/kg}$) was spiked to five samples of different matrix.

1.4. 정확성

인증표준물질의 분석 결과는 표준시료의 참값과 비교하여 평가하였다. 측정값의 정확도는 z-score 수치로 평가하였으며, KRISS 108-10-003, ERM-BD272, ERM-BD273, ERM-BD274에 대해 각각 1.00, 0.46, 1.31, -0.43의 z-score를 얻었다(Table 7). 이 결과는 아크릴아마이드의 분석값이 95% 신뢰구간($|z| < 1.96$)에서 참값과 다르지 않음을 의미하며, 본 연구에서 사용한 분석 방법의 정확성을 검증하는 결과이다.

Table 7. Accuracy of measured acrylamide concentration compared with certified reference materials (CRMs)

CRM No.	Type	Reference value ($\mu\text{g/kg}$)	Uncertainty ($\mu\text{g/kg}$)	Measured value ($\mu\text{g/kg}$)	z-score
KRISS 108-10-003	Potato chip	455	12	467	1.00
ERM -BD272	Crispbread	980	90	1021	0.46
ERM -BD273	Toasted bread	425	29	463	1.31
ERM -BD274	Rusk	74	7	71	-0.43

1.5. 재현성

본 연구에서 실험 수행자의 수행능력을 확인하기 위해 다른 실험자와 실험자간 재현성 확인을 진행한 결과, 서로 다른 세가지 농도의 표준물질을 반복 측정한 값의 변이계수는 3-6% 이었다(Table 8). 또한 일간 재현성을 확인하기 위해 2일간 연속분석을 진행한 결과 변이계수는 7%로 나타났다(Table 9). 국제적 수준의 변이계수가 15% 이하인 점을 감안할 때 본 연구에서 실시한 분석법의 재현성은 양호한 것으로 사료된다.

Table 8. Inter-individual results for the determination of acrylamide in potato chip

Spiking level ($\mu\text{g/kg}$)	Experimenter	Average \pm SD ($\mu\text{g/kg}$)	CV (%)
-	A	399 ± 12	5
	B	421 ± 19	
+10	A	406 ± 17	4
	B	427 ± 9	
+25	A	434 ± 30	6
	B	454 ± 18	
+100	A	489 ± 12	3
	B	514 ± 12	

Table 9. Inter-day results for the determination of acrylamide in potato chip

Day	Average \pm SD ($\mu\text{g/kg}$)	CV (%)
A	443 \pm 38	7
B	436 \pm 27	

2. 아크릴아마이드 분석

아크릴아마이드의 형성은 식품 조성, 가열 온도, 조리 시간, pH, 조리 시 첨가 요소, 부피와 표면적 비율에 의해 영향 받을 수 있다(Amrein *et al.*, 2004; Gertz & Klostermann, 2002; Gertz *et al.*, 2003; Jung *et al.*, 2006; Tareke *et al.*, 2002; Taubert *et al.*, 2004). 따라서 섭취 상태를 반영한 식품의 분석은 실제에 가까운 노출량 평가를 위한 필수 조건이다.

총 식이조사를 위해 선정된 186개 시료 중에서, 아크릴아마이드는 9개 그룹의 33개 시료에서 검출되었다(Table 10). 조리된 식품의 아크릴아마이드 함량은 조리로 인한 희석배수를 고려하여, 조리 전 원 식품 g 당으로 보정하여 표기하였다.

Table 10. Acrylamide levels in table-ready state foods most frequently or highly consumed in Korea ^a

Food group	Food sample	Status of analytical sample	Acrylamide concentration (ppb)	
			Mean	SD
Grains	Bread crumbs	air fried	62	5
	Bread crumbs	oil fried	103	11
	Biscuits, Cookies	as purchased	117	9
	Snacks	as purchased	106	10
	Parched or raw grain powder	as purchased	325	10
	Cereals	as purchased	54	6
	Scorched rice	as purchased	54	7
	Popcorn	as purchased	285	7
Potatoes	Potato	sautéed	95	2
	Potato	roasted	Trace ^b	-
	Potato chip	as purchased	337	41
	French fries	as purchased	469	23
Vegetables	Perilla leaves	sautéed	58	3
	Carrot	sautéed	25	3
	Garlic	sautéed	72	9
	Chinese chive	griddled	16	14
	Ginger	sautéed	75	8
Sea vegetables	Laver	roasted	71	14
Meat	Pork	roasted	33	6
	Imported beef	roasted	34	2
	Beef, Edible viscera	roasted	50	10
Fish	Eel	roasted	26	2
Nuts	Perilla	as purchased ^c	29	2
	Sesame	as purchased ^c	103	2
Oils	Sesame oil	as purchased	12	6
	Sesame oil	sautéed	12	5
	Sesame oil	boiled ^d	26	4
Seasonings	Black pepper	as purchased	492	41
	Black pepper	sautéed	5485	208

Black pepper	air fried	6115	415
Black pepper	roasted	7139	292
Curry	as purchased	22	5
Curry	boiled after sautéed	14	8
Total		33	

^a Among 186 analysed samples, acrylamide was detected in 33 samples.

A composite was made with the samples purchased from 19 markets.

^b Trace represents values over LOD and under LOQ.

^c Perilla and sesame were sold as sautéed.

^d Oil was heated till bubbles were formed (without added water).

다양한 조리 방법 중, 볶기, 튀기기, 굽기와 같이 고온의 열처리를 동반하는 조리방법은 식품 내 아크릴아마이드 함량을 증가시켰다. 감자류의 감자, 채소류의 깻잎, 당근, 마늘, 생강은 그 자체로는 아크릴아마이드를 함유하지 않는 것으로 확인되었으나, 볶은 상태에서는 모두 아크릴아마이드가 검출되었다(Figure 5). 볶기의 조리과정을 살펴보면, 감자는 175℃에서, 깻잎, 당근, 마늘, 생강은 170℃에서 조리되어 아크릴아마이드의 생성조건을 충족시킨 것으로 보인다. 이는 일반적으로 아크릴아마이드로부터 안전하다고 인식되어 온 채소류와 같은 식품군에서도 조리 가공 중 아크릴아마이드가 생성될 수 있음을 예견하는 결과라 할 수 있다. Lineback 등은 선행연구의 결과를 토대로 과일 및 채소류에서 아크릴아마이드가 10-70 ppb 혹은 10 ppb 이하로 검출되었다고 보고하였다(Lineback *et al.*, 2012). 이는 본 연구에서 볶기의 조리방법을 적용한 채소류의 검출량(16-75 ppb)과 유사한 결과이다.

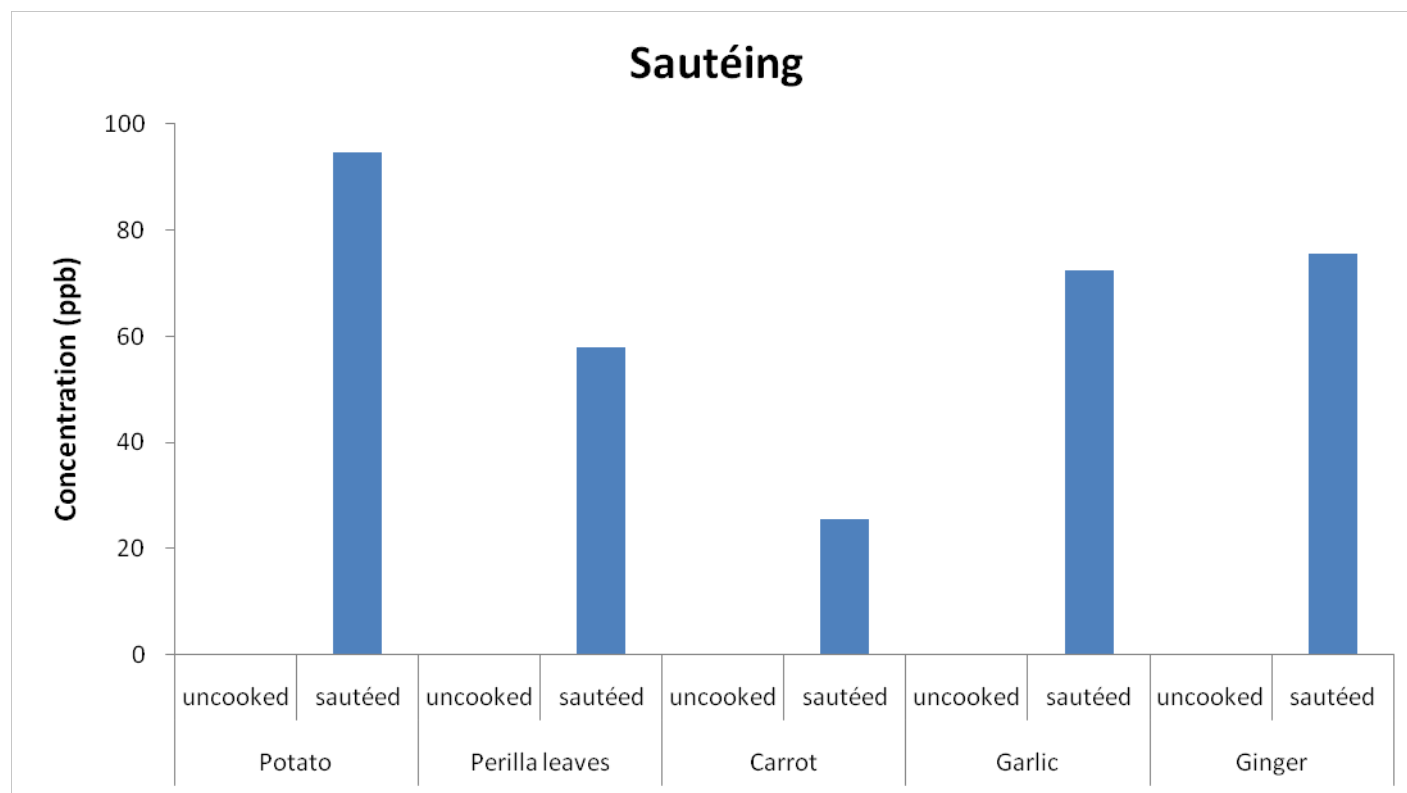


Figure 5. Comparison of acrylamide levels by sautéing in different food groups

조리 방법 중, 튀기기 방법 역시 식품 내 아크릴아마이드의 생성을 촉진시켰다. 빵가루 시료에서, 조리방법에 의한 아크릴아마이드 함량은 극명한 차이를 보였는데, 조리 전의 빵가루에서는 아크릴아마이드가 검출되지 않았으나 튀기기 시 62 ppb, 기름튀기기의 방법으로 조리 시 103 ppb의 아크릴아마이드가 검출되었다(Figure 6). 본 연구에서 튀기기의 조리방법은 180℃로 예열된 후라이팬에서 1분 가열로 진행되었으며, 기름튀기기의 경우 180℃로 예열된 콩기름에서 40초 조리되었다. 이는 튀기기 조리 방법을 사용하였을 시 온도가 아크릴아마이드의 생성 조건을 충족시킨 것뿐만 아니라 기름 사용시 아크릴아마이드 생성이 더 크게 증가할 수 있음을 의미한다. Mestdagh 등은 기름 사용시 열의 전달이 용이하고, 식품 내 열의 분포가 빠르게 일어나는 것이 아크릴아마이드 생성량 증가의 원인이 될 수 있다고 추측하였다(Mestdagh *et al.*, 2005).



Figure 6. Comparison of acrylamide levels by frying in different food groups

굽기 조리방법 역시 식품 내 아크릴아마이드 함량을 증가시켰다(Figure 7). 이는 감자류의 감자뿐만 아니라 육류, 어패류 및 해조류의 식품에서도 아크릴아마이드를 생성시켰다. 육류의 돼지고기, 쇠고기수입우, 쇠고기부산물 시료에서는 그대로, 끓이기, 볶기 조리 시에는 아크릴아마이드가 검출되지 않았으나, 굽기 조리 시 선택적으로 아크릴아마이드가 검출되었다(33-50 ppb). 국내 모니터링에서 식육제품의 아크릴아마이드가 20 ppb 이하로 검출된 연구가 있다(김 *et al.*, 2009). 김 등은 분석에 사용된 식육제품이 즉석섭취식품을 제외한 일부 식품의 경우 섭취 상태가 아닌 판매 상태로 분석되었으므로, 실제 섭취상태의 아크릴아마이드 함량은 보고된 농도보다 높을 수 있다고 예상하였다. 본 연구에서, 굽기 방법으로 조리하였을 시 시료에서 아크릴아마이드가 검출된 결과를 통해, 섭취 상태를 반영한 분석이 식생활의 노출량 결정에 중요함을 시사한다. 그러나 육류의 경우 아크릴아마이드의 전구체로 알려진 아스파라긴과 환원당이 제한적으로 존재하므로, 높은 온도로 가공되는 경우에도 아크릴아마이드 함량이 높게 나타나지 않는다(Lineback *et al.*, 2012). 감자의 아스파라긴 함량은 2010-4250 mg/kg 로 보고된 반면, 육류의 아스파라긴 함량은 10-12 mg/kg 정도로 보고된 연구 결과를 통해, 전구체 함량의 차이를 확인 할 수 있다(Amrein *et al.*, 2003; Flores *et al.*, 2000). 어패류의 장어, 해조류의 김에서 역시 그 자체는 아크릴아마이드를 함유하지 않았으나 굽기 방법으로 조리 시 아크릴아마이드가 검출되었다. 김의

경우 ND-135 ppb로 아크릴아마이드가 검출되었던 조미 김의 결과와 비교하면(이상희, 2011), 아크릴아마이드 생성은 식품의 조리 과정 중 온도와 첨가 조미료에 따라 영향 받는 것으로 보인다.

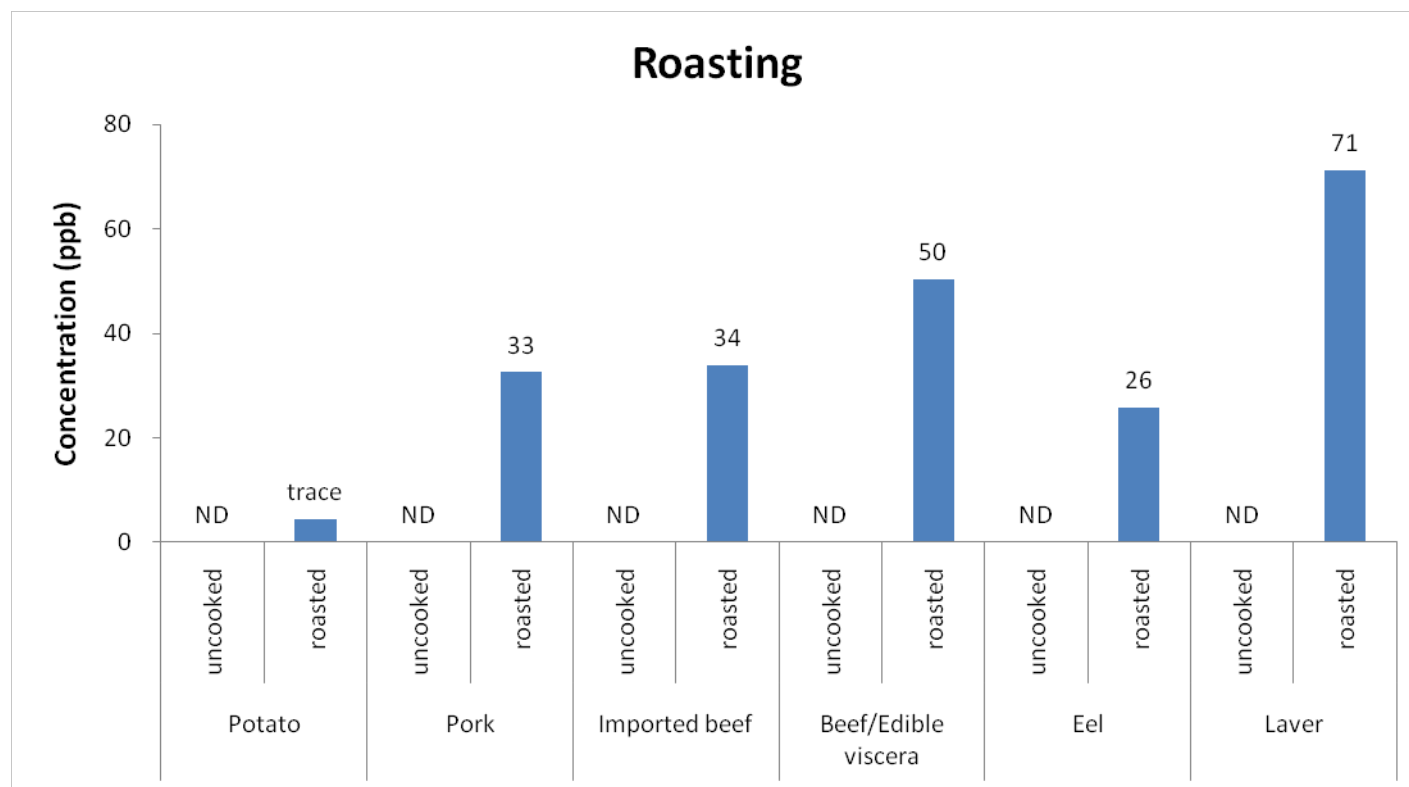


Figure 7. Comparison of acrylamide levels by roasting in different food groups

분석 결과, 가공과정을 거치지 않은 식품에서는 아크릴아마이드가 검출되지 않았다. 아크릴아마이드가 검출된 들깨와 깨, 흰깨의 경우, 볶은 상태로 된 것을 구입하여 분석하였으므로, 가공과정을 거친 식품으로 고려하였다. Svensson 등과 Tareke 등의 연구결과에서도, 가열하지 않은 식품과 끓이기 조리방법을 사용한 식품에서는 아크릴아마이드가 검출되지 않았다(Svensson *et al.*, 2003; Tareke *et al.*, 2002). 이와 일치하는 경향으로, 누룽지와 들깨의 경우 그 자체로는 아크릴아마이드를 함유하는 것으로 보였으나, 끓이기 조리법을 사용한 경우 아크릴아마이드가 검출되지 않았다(Figure 8). 이는 가열의 과정을 동반하나, 끓이기 조리법 시 추가되는 물의 비점이 100℃임을 고려한다면 아크릴아마이드 생성조건을 충족시키지 못하였기 때문으로 사료된다. 또한 추가된 물에 의해 아크릴아마이드가 희석되어 검출이 확인되지 않았을 가능성 또한 존재하는 것으로 보인다.

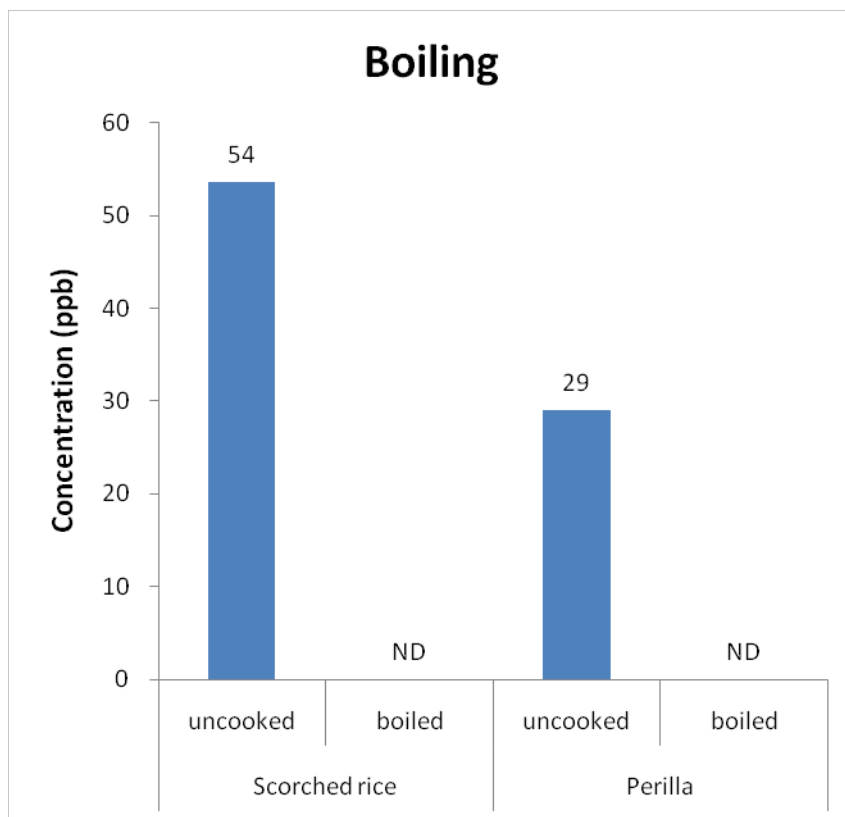


Figure 8. Comparison of acrylamide levels by boiling in different food groups

분석이 진행된 시료 중 가장 높은 아크릴아마이드 함량을 나타낸 것은 조미료류의 후추분말이다. 구입 상태의 후추분말 시료에서 492 ppb의 아크릴아마이드가 검출되었음을 고려한다면, 후추분말 시료의 경우 조리 과정 중에서 아크릴아마이드 함량이 크게 증가하였음을 확인할 수 있다(Table 10). 후추분말의 아크릴아마이드는 제조 공정의 건조 단계에 포함된 가열과정에서 생성된 것으로 추측된다. 또한 부피에 비해 표면적 비율이 큰 만큼, 가열 시 열에 의한 아크릴아마이드 생성이 크게 증가했다고 예측할 수 있다. 후추분말 시료의 아크릴아마이드 함량은 국내 연구에서 300 ppb로 보고된 적이 있다(김미교 *et al.*, 2009). 그러나 조리 시 후추분말의 아크릴아마이드 함량 변화에 대해서는 보고된 바가 없으며, 본 실험에서 아크릴아마이드 검출량이 크게 나타난 만큼, 추후 조리 조건을 반영한 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

감자는 아스파라진의 함량이 높기 때문에 상대적으로 높은 농도의 아크릴아마이드가 검출되는 대표적인 식품이다(Becalski *et al.*, 2003). 본 실험의 감자류에서 아크릴아마이드는 French fries (449 ppb), 감자칩(337ppb), 볶은 감자(95 ppb)에서 검출되었으며 굽기의 조리방법을 적용한 경우 정량한계 이하의 아크릴아마이드가 확인되었다. 조리된 감자의 경우, 굽기의 조리방법을 적용한 감자에서 볶기의 조리를 거친 감자에 비해 적은 농도의 아크릴아마이드가 검출되었다. 시료 준비

단계에서, 볶기의 경우 175℃에서 12분, 굽기의 경우 180℃에서 60분의 가열과정이 수반되었다. Becalski 등은 다양한 조리 시간 조건에서, 아크릴아마이드 함량은 10분에서 최대였으며 시간이 지남에 따라 감소했음을 보고하였다(Becalski *et al.*, 2003). 이는 본 실험의 결과와도 일치하는 경향이며, 60분을 가열한 굽기의 경우 아크릴아마이드가 파괴되었을 가능성이 존재하는 것으로 보인다.

곡류로 분류되는 식품 중 다양한 시료에서 역시 아크릴아마이드가 검출되었다(Table 10). 미숫가루/선식/생식 시료는 325 ppb의 아크릴아마이드가 검출되었는데, 이는 국내 유통되는 미숫가루를 분석하여 201 ppb를 보고한 김미교 등의 결과와 비교할 수 있다(김미교 *et al.*, 2009). 또한 팝콘의 경우 FDA에서 실시한 총 식이조사(2003-2006)의 연구결과(97-352 ppb)와 유사한 수준의 아크릴아마이드가 확인되었다(285 ppb). 이 외에도 아크릴아마이드는 비스킷, 스낵, 시리얼에서도 발견되었다.

올리브유와 콩기름과는 달리, 유지류의 참기름은 그 자체로 아크릴아마이드를 함유하는 것으로 확인되었다(12 ppb). 이것은 볶은 참깨를 이용하여 착유의 공정을 거치는 제조과정에서 생성된 것으로 사료된다.

3. 노출 평가

한국인의 아크릴아마이드 식이 노출량은 Table 11에 나타났다. 전체 인구에 대한 아크릴아마이드 노출량은 1인 1일 3721 ng이며 단위 체중 고려 시, 71 ng/kg bw/day 이었다. 총 식이조사를 시행한 다른 국가의 경우 U.S. FDA에서는 2세 이상의 인구에 대해 0.4 $\mu\text{g/kg}$ bw/day의 노출량을 보고하였으며, 프랑스에서는 성인의 경우 0.43 $\mu\text{g/kg}$ bw/day, 어린이의 경우 0.69 $\mu\text{g/kg}$ bw/day의 노출량을 보고하였다(Sirot *et al.*, 2012). 이를 고려한다면, 총 식이조사 방법을 사용하여 산출한 한국인의 아크릴아마이드 노출량은 다른 국가의 노출량과 비교하여 상당히 낮은 편이다.

한국인의 아크릴아마이드 노출량은 비대칭분포의 형태를 띠는 것으로 보인다. 노출량의 중앙값(50th 퍼센타일)은 평균값에 비해 상당히 낮았지만, 반면에 75th 퍼센타일에 속하는 사람의 노출량은 평균값에 근사했다. 이것은 노출량이 고섭취군에게 집중되어 있음을 예견하는 결과이다.

Table 11. Estimated dietary exposure and distribution of acrylamide for Korean population ^a

Unit	N	Mean	SE	Exposure distribution percentiles						
				5 th	10 th	25 th	50 th	75 th	90 th	95 th
ng/person/day	8019	3721	222	0	0	27	475	3476	9971	17351
ng/kg bw/day	7535	71	4	0	0	1	8	67	192	329

^a Dietary exposure was estimated based on the food intake of 2010 KNHANES

연령에 따른 아크릴아마이드 노출량 분포는 Figure 9에 나타냈다. 노출량의 분포패턴은 연령에 따라 비슷한 경향을 보였다. 그러나 65세 인구의 87%가 20 ng/kg bw/day 이하 수준의 아크릴아마이드 노출량에 분포하였으나, 3-5세는 29%만이 20 ng/kg bw/day 이하의 노출량에 분포하여, 낮은 연령 그룹일수록 높은 노출량에 분포하는 경향을 확인하였다. 이러한 경향은 낮은 연령 그룹에서의 평균노출량 증가를 초래한 것으로 추측된다(Table 12). 평균적으로 단위체중 당 아크릴아마이드 노출량이 가장 큰 연령은 1-2세(202 ng/kg bw/day)로, 전체 인구의 평균 노출량(71 ng/kg bw/day)과 비교하였을 시, 3배에 가까운 노출량을 보였다. 노출량은 연령이 증가할수록 감소하는 추세였으며, 30-49세, 50-64세, 65세 이상의 연령에서는 전체 인구의 평균노출량(71 ng/kg bw/day)보다 적은 양으로 아크릴아마이드에 노출되고 있음이 확인되었다.

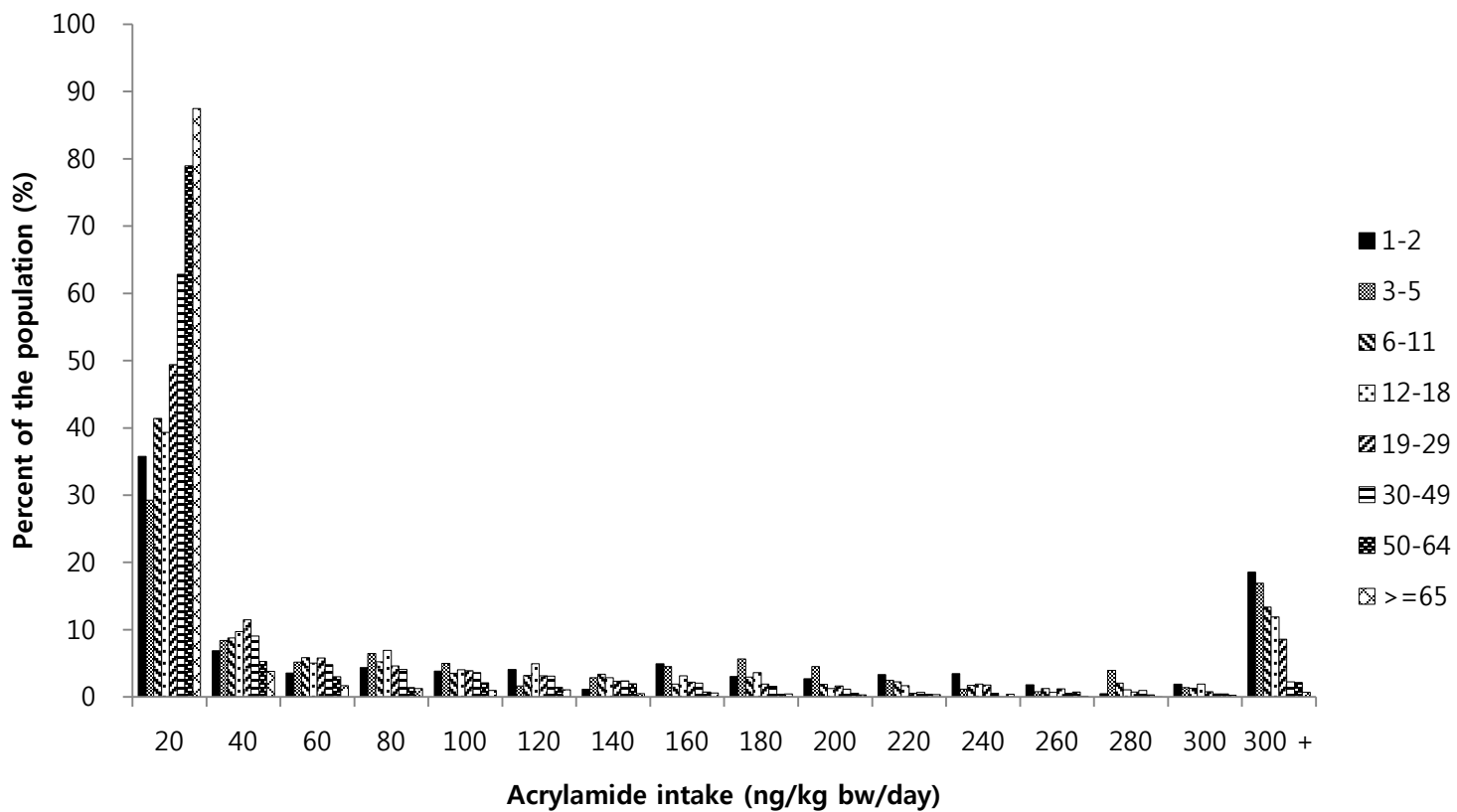


Figure 9. Distribution of acrylamide intake (ng/kg bw/day) in different age groups

Table 12. Estimated acrylamide exposure (ng/kg bw/day) in different age groups

Age	N	Acrylamide exposure	
		Mean	95 th percentile
1-2	237	202	906
3-5	344	185	674
6-11	758	143	504
12-18	639	143	547
19-29	623	93	445
30-49	2074	50	210
50-64	1530	30	168
65+	1330	16	96

Table 13은 아크릴아마이드 노출에 대한 10개 주요 기여 식품을 나타낸다. 전체적으로, 감자, 비스킷, 후추가 아크릴아마이드 식이노출에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 그러나 아크릴아마이드 노출에 대한 기여식품은 연령에 따라 차이가 있는 것으로 보였다. 비스킷과 스낵은 연령이 증가함에 따라 기여도가 감소하였고, 미숫가루는 그와 반대되는 경향을 보였다. 다른 연령에 비해 감자칩은 12-18세에서 가장 높은 비중을 보였으며, 프렌치프라이는 19-29세 그룹에서 높은 기여도를 보였다. 이것은 과자류와 패스트푸드를 즐기는 소비패턴으로 인한 것으로 보인다. 돼지고기와 소고기는 30-49세의 아크릴아마이드 노출량에 큰 기여도를 보였다. 전반적으로, 한국인의 아크릴아마이드 노출에는 감자와 후추분말과 같이 가정에서 조리하는 식품을 통한 섭취가 가공식품 섭취에 의한 노출보다 높은 기여를 하는 것으로 확인되었다.

식품의 기여도는 국가의 식습관을 반영한다. Mucci와 Wilson은 스웨덴, 네덜란드, 미국의 아크릴아마이드 기여도를 비교하였는데, 감자제품, 커피, 시리얼이 노출에 큰 기여를 하였다(Mucci & Wilson, 2008). 프랑스의 총 식이조사에서도 유사한 경향이 관찰되었는데 프렌치프라이, 커피, 비스킷이 성인의 아크릴아마이드 노출량에 80% 이상을 차지하였다(Sirot *et al.*, 2012). 프랑스의 총 식이조사결과, 0.43 $\mu\text{g/kg bw/day}$ 의 아크릴아마이드에 노출되는 프랑스인의 경우 감자류를

통한 노출은 $0.193 \mu\text{g/kg bw/day}$ 이었으며 이는 전체 노출량의 44.8%를 차지한다. 그러나 중국의 노출평가에서는 다소 차이가 있었는데, 밀가루제품이 주요 노출기여식품이었으며, 그 뒤로 감자류와 향신료가 주요 노출원이었다(Chen *et al.*, 2008). 중국인에게 조미료류의 향신료는 아크릴아마이드 노출의 13%를 차지하였으며, 평균적으로 $0.38 \mu\text{g/kg bw/day}$ 의 아크릴아마이드에 노출되는 중국인의 감자류를 통한 노출량은 $0.07 \mu\text{g/kg bw/day}$ 으로 18% 정도에 불과했다. 본 연구와 Chen 등의 결과(Chen *et al.*, 2008)를 통해, 아시아인의 식생활에서는 감자류로 인한 아크릴아마이드의 노출량이 전반적으로 낮아, 상대적으로 조미료류가 아크릴아마이드 노출에 중요한 요소로 작용함을 확인할 수 있다.

Table 13. Ten foods that contribute most to the acrylamide exposure for Korean population

Foods	Contribution (%) in age groups							
	1-2	3-5	6-11	12-18	19-29	30-49	50-64	65+
Potato	27	23	35	30	16	29	20	29
Biscuits, Cookies	28	31	18	15	9	7	10	10
Black pepper	4	9	7	12	18	17	17	9
Parched/raw grain powder	3	4	3	2	4	8	15	16
Snacks	10	11	9	7	7	5	3	1
French fries	10	2	6	9	16	1	1	0
Pork	2	3	4	3	3	6	7	7
Potato chip	5	1	4	8	5	2	0	0
Imported beef	1	2	2	2	3	6	5	4
Carrot	2	2	2	2	3	4	3	3

4. 위해도 결정

신경독성에 대해 JECFA에서는 NOAEL을 0.2 mg/kg bw/day로 결정하였고, 결정된 NOAEL값과 섭취량을 비교하였을 때, 일반 섭취자의 경우 MOE가 200으로 산출되어, 아크릴아마이드에 대한 신경독성은 무시할만한 수준으로 결론지었다. 본 연구에서는 95th 퍼센타일의 노출량이 0.3 µg/kg bw/day으로, NOAEL의 1.5/1000배 수준이므로 한국인의 신경독성에 대한 위해도는 매우 낮은 것으로 사료된다.

아크릴아마이드의 발암성에 대한 위해도 결정은 두 가지 방법으로 진행되었다. 첫 번째 방법은 노출안전력(MOE)를 이용한 것으로 용량-반응평가에서 독성작용이 일어나는 농도와 노출량을 비교하는 평가이다. 일반적으로 MOE개념은 오염물질 관리의 우선순위 결정에 사용된다(IPCS, 2004). MOE를 추정하기 위해 BMD(benchmark dose) 접근법을 사용하였는데, 64차 JECFA에서는 마우스의 하더리안선 종양과 랫드의 유선 종양에 대한 BMDL₁₀을 제시하고 있다. 본 연구에서 아크릴아마이드 평균 노출량은 71 ng/kg bw/day였으며, 고노출군(95th 퍼센타일)의 경우 노출량은 329 ng/kg bw/day이었다(Table 11). 이를 적용하여 산출된 MOE 결과는 Table

14에 나타내었다. 전체 인구의 평균노출량과 고노출군의 노출량을 유선종양의 BMDL₁₀에 적용하였을 때, 산출된 MOE는 4355, 943이었다. 하더리안선 종양을 고려한 경우 MOE는 평균노출군에서 2528, 고노출군에 대해 548이었다. JECFA(2005)는 일반 섭취자에 대한 MOE가 유선 종양에 대해 310이었고, 하더리안선 종양에 대해 180이라고 보고하였다. Claeys 등은 벨기에인에 대해 50th 퍼센타일의 노출량이 0.2 µg/kg bw/day 이었으며, 이때 유선종양에 대한 MOE가 1500 이라고 밝혔다(Claeys *et al.*, 2010). MOE 수치가 클수록 오염물질에 의한 위해가 작다는 것을 의미하므로, 다른 국가의 위해평가 자료와 비교할 때, 한국인의 아크릴아마이드에 의한 위해는 상당히 낮은 편이지만 무시할 정도의 수준은 아니라고 판단된다. JECFA(2005) 평가에 의하면, 발효식품이나 발효음료에서 발견되는 인체발암가능물질(Group 2B)인 ethyl carbamate의 MOE는 발효주 섭취를 제외한 경우 20000(발효주 섭취 포함 시 3800), 유기물질의 가열과정에서 생성되는 발암물질인 polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)의 MOE는 평균 노출군의 경우 25000이었다. 아크릴아마이드는 이들 발암원에 비해 낮은 MOE 수치를 가지므로 우선적인 유해물질 관리대상으로 고려된다. 그러나 MOE가 450-2472로 산출된 유럽식품안전청의 아플라톡신 위해평가 결과와 비교하면, 아크릴아마이드는 아플라톡신에 비해 낮은 우선순위 관리물질이다(EFSA, 2007).

아크릴아마이드의 발암성에 대한 두 번째 평가는 저용량 외삽을 이용한 평가이다. 이 경우, 초과발암위해도는 CSF (q_1^*)을 이용하여 계산된다. U.S. EPA (2010)에서는 수컷 랫드의 갑상선 종양과 고환 초막 중피종을 포괄하는 실험 결과를 통해 $0.5 \text{ (mg/kg bw/day)}^{-1}$ 의 CSF를 산출하였다. Dybing과 Sanner는 유선종양에 대한 CSF를 $1.3 \text{ (mg/kg bw/day)}^{-1}$ 로 보고하였다(Dybing & Sanner, 2003). 아크릴아마이드 노출량에 대한 초과발암위해도는 Table 14에 나타났다. 평균 노출군의 경우 식이로 제공되는 아크릴아마이드로 인해 인구 10^5 당 4에서 9명이 암이 발생할 가능성이 있다. 이와 비교하여 국내 다른 유해물질 평가에서는, PAHs의 경우 인구 백만명 당 6-7명 정도의 위암 발생 위험 가능성이 존재하며(식약청, 2002), 아플라톡신 B₁의 경우, B형간염 비보균자의 경우 1억명당 4명, 보균자의 경우 백만명당 약 1명이 초과적으로 간암에 발생할 가능성이 있다고 보고하고 있다(식약청, 2004).

Table 14. Health risk estimates for the dietary acylamide of Korean population

Margin of exposure (MOE)				Lifetime cancer risk ^a			
Tumour	BMDL ₁₀ ^b	Mean intake	95 th intake	Source	Cancer slope factor ^c	Mean intake	95 th intake
Mammary gland fibroadenoma	0.31	4355	943	U.S.EPA (2010)	0.5	4	16
Harderian gland adenoma	0.18	2528	548	Dybing and Sanner (2003)	1.3	9	43

^a Lifetime cancer risk presented by implied risk per 10⁵ people

^b Unit of BMDL₁₀: mg/kg bw/day

^c Unit of cancer slope factor: mg /kg bw/day⁻¹

이러한 예비 평가는 몇 가지 측면에서 불확실성을 가진다. 비록 본 실험에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 조리법을 적용하여 시료를 준비하였지만, 이것은 실제 가정에서의 다양한 조리와는 차이가 있을 수 있다. 또한 전체 식품의 분석이 아닌 선정된 식품만의 분석 결과는 실제 노출량에 비해 과소평가되었을 가능성을 배제할 수 없다. 위해도 결정의 관점에서는 사람에서의 발암영향에 대한 직접적 연구가 없기 때문에, 동물실험의 결과를 외삽하는 과정에서 동물과 사람의 중간 차이가 예상된다. 특히 초과발암위해도로 위해도를 결정하는 경우 고용량에서 저용량으로의 외삽 시 직선성을 가정한 가설에서 오차가 발생할 수 있다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 총 식이조사를 통하여 한국인의 식생활을 반영한 시료를 대상으로 아크릴아마이드를 분석했다는 것에 그 의의가 있다. 분석 대상 식품은 국민건강영양조사(2008-2010) 자료를 토대로 섭취량과 섭취빈도를 고려한 다소비, 다빈도 식품뿐만 아니라 선행연구에서 아크릴아마이드가 고농도로 검출된 식품을 고려하여 선정하였으며, 각 식품은 전국 19개소의 마트에서 구입된 후 섭취 상태를 반영한 composite 시료 형태로 분석되었다. 분석은 분석법 검증을 통하여 검증된 분석방법을 사용하였으며, 이를 통해 분석의 신뢰성을 확보하였다.

분석 결과, 총 186개 분석대상 시료 중 33개 시료에서 아크릴아마이드가 검출되었다. 검출이 확인된 시료의 아크릴아마이드 분석 결과는 국민건강영양조사(2010)의 개인 섭취량 자료에 적용되어 노출량 산출에 이용되었다. 이것은 섭취되는 형태를 반영한 분석 결과를 이용함으로써 실제에 가까운 개인별 노출량 산출을 가능하게 하였다.

본 연구에서 일반 노출군의 경우, 식이를 통한 아크릴아마이드 노출량은 3721 ng/person/day 이었으며, 체중 고려 시 71 ng/kg bw/day으로 산출되었다. 단위 체중 당 노출량 분포를 통해, 낮은

연령일수록 높은 농도의 아크릴아마이드 노출량에 분포하는 인구 비중이 높음을 확인하였고, 이러한 결과는 어린 연령에서의 위해가 클 수 있음을 암시하였다. 아크릴아마이드 노출에 대한 기여 식품 또한 연령에 따라 차이가 있었으며, 이는 연령별로 식습관에 차이가 있음을 의미한다. 한국인의 아크릴아마이드 노출에는 감자, 비스킷, 후추가 큰 부분을 차지하였다. 이것은 기존에 발표된 제외국의 결과와는 다른 식습관 패턴을 반영하며, 한국인에게서는 가공식품보다 가정에서 만든 식품으로 기인한 아크릴아마이드 노출이 큰 부분을 차지함을 의미한다. 따라서 가정에서의 아크릴아마이드 함량을 줄이기 위한 표준 조리방법 설정 및 교육과 홍보가 필요할 것으로 사료된다.

위해평가 결과, 아크릴아마이드로 인한 한국인의 위해도는 다른 국가의 위해도에 비해 낮았지만, 인구 10^5 당 4명에서 9명의 초과 위해가 존재함을 확인하여, 여전히 건강 위해 수준에 있었다. 특히, 아크릴아마이드 섭취에 의한 위해는 낮은 연령에서 더 큰다는 점을 고려한다면, 식품 중 아크릴아마이드에 대한 지속적인 모니터링이 수행되어야 할 것이다.

VI. 참고문헌

- 김미교, 오미화, 윤수현, 김청태, 성동은, 함준상, 최동미, 오상석. 2009. 국내에서 유통된 식품의 아크릴아마이드 함량 분석. *한국식품위생안전성학회지* 24(3):238-246.
- 식품의약품안전청연구보고서. 2004. 한국인의 대표식단 중 오염물질 섭취량 및 위해도 평가
- 식품의약품안전청연구보고서. 2002. 식품 중 PAHs 화합물의 위해성평가
- 최동미. 2007. 가공식품 중 아크릴아마이드 분석. *분석과학* 20(2):164-169.
- FAO/WHO. 2002. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)/World Health Organization (WHO). Consultation on the health implications of acrylamide in food. 25-27 June 2002. Geneva, Switzerland. Available from: http://www.who.int/foodsafety/publications/chem/en/acrylamide_summary.pdf
- SNFA. 2002. Swedish National Food Administration. Information of acrylamide in food. Stockholm (Sweden). Available from: <http://www.slv.se/>
- IPCS. 1985. International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria 49. Acrylamide. Available from: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc49.htm>
- IPCS. 2004. International Programme on Chemical Safety. Principles for modelling low-dose response for risk assessment of chemicals Available from: http://www.who.int/ipcs/food/risk_assessment/en/
- IARC. 1994. International Agency for Research on Cancer. Summaries & Evaluations: Acrylamide (Group 2A). Vol. 60, p.389. Available from: <http://www.inchem.org/documents/iarc/vol60/m60-11.html>
- WHO. 2005. World Health organization. Total diet studies: A recipe for safer food. Available from: http://www.who.int/foodsafety/chem/TDS_recipe_2005_en.pdf

- U.S. FDA. 2006. Food & Drug Administration. The 2006 Exposure Assessment for Acrylamide. Available from:
<http://www.fda.gov/downloads/Food/FoodSafety/FoodContaminantsAdulteration/ChemicalContaminants/Acrylamide/UCM197239.pdf>
- U.S. FDA. 2003. Food & Drug Administration. Detection and Quantitation of Acrylamide in Foods. Available from:
<http://www.fda.gov/Food/FoodSafety/FoodContaminantsAdulteration/ChemicalContaminants/Acrylamide/ucm053537.htm>
- U.S. EPA. 2010. Environmental Protection Agency. Toxicological review of acrylamide. In support of summary information on the integrated risk information system (IRIS).
- FSA. 2005. Food Standards Agency. Analysis of Total Diet Study samples for acrylamide. Available from:
<http://www.food.gov.uk/multimedia/pdfs/fsis712005.pdf>
- ANSES. 2011. French agency for food, environmental and occupational health & safety. Second French Total Diet Study (TDS 2) Report 2. Pesticide residues, additives, acrylamide and polycyclic aromatic hydrocarbons. Available from:
<http://www.tds-exposure.eu/sites/default/files/WP1/RapportEAT2EN2.pdf>
- JECFA. 2005. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Summary and conclusions of the sixty-fourth meeting of the joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Rome, 8-17 February 2005. Available from:
ftp://ftp.fao.org/es/esn/jecfa/jecfa64_summary.pdf
- Ahn J, Castle L, Clarke D, Lloyd A, Philo M, Speck D. 2002. Verification of the findings of acrylamide in heated foods. *Food Additives & Contaminants* 19(12):1116-1124.
- Amrein TM, Bachmann S, Noti A, Biedermann M, Barbosa MF, Biedermann-Brem S, Grob K, Keiser A, Realini P, Escher F. 2003. Potential of acrylamide formation, sugars, and free asparagine in potatoes: a comparison of cultivars and farming systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(18):5556-5560.
- Amrein TM, Schönbachler B, Escher F, Amadò R. 2004. Acrylamide in gingerbread: critical factors for formation and possible ways for reduction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(13):4282-4288.
- Barber D, Hunt J, Ehrich M, Lehning E, LoPachin R. 2001. Metabolism, toxicokinetics and hemoglobin adduct formation in rats following subacute and subchronic acrylamide dosing. *Neurotoxicology* 22(3):341-353.

- Becalski A, Lau BPY, Lewis D, Seaman SW. 2003. Acrylamide in foods: occurrence, sources, and modeling. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(3):802-808.
- Bråthen E, Knutsen SH. 2005. Effect of temperature and time on the formation of acrylamide in starch-based and cereal model systems, flat breads and bread. *Food Chemistry* 92(4):693-700.
- Burek J, Albee R, Beyer J, Bell T, Carreon R, Morden D, Wade C, Hermann E, Gorzinski S. 1980. Subchronic toxicity of acrylamide administered to rats in the drinking water followed by up to 144 days of recovery. *Journal of environmental pathology and toxicology* 4(5-6):157.
- Chen F, Yuan Y, Liu J, Zhao G, Hu X. 2008. Survey of acrylamide levels in Chinese foods. *Food additives and contaminants* 1(2):85-92.
- Claeys W, Baert K, Mestdagh F, Vercammen J, Daenens P, De Meulenaer B, Maghuin-Rogister G, Huyghebaert A. 2010. Assessment of the acrylamide intake of the Belgian population and the effect of mitigation strategies. *Food additives and contaminants* 27(9):1199-1207.
- Dybing E, Sanner T. 2003. Risk assessment of acrylamide in foods. *Toxicological Sciences* 75(1):7-15.
- Fennell TR, Sumner SCJ, Snyder RW, Burgess J, Spicer R, Bridson WE, Friedman MA. 2005. Metabolism and hemoglobin adduct formation of acrylamide in humans. *Toxicological Sciences* 85(1):447-459.
- Flores M, Moya V, Aristoy M, Toldrá F. 2000. Nitrogen compounds as potential biochemical markers of pork meat quality. *Food Chemistry* 69(4):371-377.
- Friedman MA, Dulak LH, Stedham MA. 1995. A lifetime oncogenicity study in rats with acrylamide. *Toxicological Sciences* 27(1):95-105.
- Fuhr U, Boettcher MI, Kinzig-Schippers M, Weyer A, Jetter A, Lazar A, Taubert D, Tomalik-Scharte D, Pournara P, Jakob V. 2006. Toxicokinetics of acrylamide in humans after ingestion of a defined dose in a test meal to improve risk assessment for acrylamide carcinogenicity. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention* 15(2):266-271.
- Gertz C, Klostermann S. 2002. Analysis of acrylamide and mechanisms of its formation in deep-fried products. *European Journal of Lipid Science and Technology* 104(11):762-771.
- Gertz C, Klostermann S, Kochhar SP. 2003. Deep frying: the role of water from food being fried and acrylamide formation. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 10(4):297-303.

- Hagmar L, Törnqvist M, Nordander C, Rosén I, Bruze M, Kautiainen A, Magnusson AL, Malmberg B, Aprea P, Granath F. 2001. Health effects of occupational exposure to acrylamide using hemoglobin adducts as biomarkers of internal dose. *Scandinavian journal of work, environment & health*:219-226.
- He F, Zhang S, Wang H, Li G, Zhang Z, Li F, Dong X, Hu F. 1989. Neurological and electroneuromyographic assessment of the adverse effects of acrylamide on occupationally exposed workers. *Scandinavian journal of work, environment & health*:125-129.
- Ikedo G, Miller E, Sapienza P, Michel T, King M, Sager A. 1985. Maternal-foetal distribution studies in late pregnancy. II. Distribution of [¹⁴C] acrylamide in tissues of beagle dogs and miniature pigs. *Food and Chemical Toxicology* 23(8):757-761.
- Ikedo G, Miller E, Sapienza P, Michel T, King M, Turner V, Blumenthal H, Jackson WE, Levin S. 1983. Distribution of [¹⁴C]-labelled acrylamide and betaine in fetuses of rats, rabbits, beagle dogs and miniature pigs. *Food and Chemical Toxicology* 21(1):49-58.
- Johnson KA, Gorzinski SJ, Bodner KM, Campbell RA, Wolf CH, Friedman MA, Mast RW. 1986. Chronic toxicity and oncogenicity study on acrylamide incorporated in the drinking water of Fischer 344 rats. *Toxicology and Applied Pharmacology* 85(2):154-168.
- Jung M, Choi D, Ju J. 2006. A novel technique for limitation of acrylamide formation in fried and baked corn chips and in French fries. *Journal of Food Science* 68(4):1287-1290.
- Kütting B, Schettgen T, Schwegler U, Fromme H, Uter W, Angerer J, Drexler H. 2009. Acrylamide as environmental noxious agent: a health risk assessment for the general population based on the internal acrylamide burden. *International journal of hygiene and environmental health* 212(5):470-480.
- Kadry AM, Friedman MA, Abdel-Rahman MS. 1999. Pharmacokinetics of acrylamide after oral administration in male rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 7(2):127-133.
- Konings E, Baars A, Van Klaveren J, Spanjer M, Rensen P, Hiemstra M, Van Kooij J, Peters P. 2003. Acrylamide exposure from foods of the Dutch population and an assessment of the consequent risks. *Food and Chemical Toxicology* 41(11):1569-1579.

- Lineback DR, Coughlin JR, Stadler RH. 2012. Acrylamide in Foods: A Review of the Science and Future Considerations. *Annual Review of Food Science and Technology* 3:15-35.
- Matthys C, Bilau M, Govaert Y, Moons E, De Henauw S, Willems J. 2005. Risk assessment of dietary acrylamide intake in Flemish adolescents. *Food and Chemical Toxicology* 43(2):271-278.
- Mccollister D, Oyen F, Rowe V. 1964. Toxicology of acrylamide. *Toxicology and Applied Pharmacology* 6(2):172-181.
- Mestdagh FJ, De Meulenaer B, Van Poucke C, Christ'l Detavernier, Cromphout C, Van Peteghem C. 2005. Influence of oil type on the amounts of acrylamide generated in a model system and in French fries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(15):6170-6174.
- Miller M, Carter D, Sipes I. 1982. Pharmacokinetics of acrylamide in Fisher-334 rats. *Toxicology and Applied Pharmacology* 63(1):36-44.
- Mottram DS, Wedzicha BL, Dodson AT. 2002. Food chemistry: acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature* 419(6906):448-449.
- Mucci LA, Wilson KM. 2008. Acrylamide intake through diet and human cancer risk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(15):6013-6019.
- Şenyuva H, Gökmen V. 2005. Survey of acrylamide in Turkish foods by an in-house validated LC-MS method. *Food additives and contaminants* 22(3):204-209.
- Sirot V, Hommet F, Tard A, Leblanc JC. 2012. Dietary acrylamide exposure of the French population: Results of the second French Total Diet Study. *Food and Chemical Toxicology*.
- Stadler RH, Blank I, Varga N, Robert F, Hau J, Guy PA, Robert MC, Riediker S. 2002. Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature* 419(6906):449-450.
- Svensson K, Abramsson L, Becker W, Glynn A, Hellenäs KE, Lind Y, Rosen J. 2003. Dietary intake of acrylamide in Sweden. *Food and Chemical Toxicology* 41(11):1581-1586.
- Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, Eriksson S, Törnqvist M. 2000. Acrylamide: a cooking carcinogen? *Chemical research in toxicology* 13(6):517-522.
- Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, Eriksson S, Törnqvist M. 2002. Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(17):4998-5006.

- Taubert D, Harlfinger S, Henkes L, Berkels R, Schömig E. 2004. Influence of processing parameters on acrylamide formation during frying of potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(9):2735-2739.
- Tyl RW, Marr MC, Myers CB, Ross WP, Friedman MA. 2000. Relationship between acrylamide reproductive and neurotoxicity in male rats. *Reproductive Toxicology* 14(2):147-157.
- Zyzak DV, Sanders RA, Stojanovic M, Tallmadge DH, Eberhart BL, Ewald DK, Gruber DC, Morsch TR, Strothers MA, Rizzi GP. 2003. Acrylamide formation mechanism in heated foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(16):4782-4787.

Acknowledgement

This study was supported by a grant (12162KFDA006) from Korea Food & Drug Administration in 2012.

Abstract

Risk Assessment of Acrylamide in a Korean Total Diet Study

Minjeong Kim

Department of Food and Nutrition

The graduate school

Seoul National University

The presence of acrylamide in foods has become a problem due to its carcinogenicity. Many countries have conducted monitoring of acrylamide in domestic food and estimated its exposure level. Recently, a total diet study (TDS) is encouraged to assess contaminants through the entire diet. Thus, the purpose of this study was to estimate dietary exposure and to perform risk assessment of acrylamide in a Korean total diet study. In this study, 186 food samples were selected by frequency and amount of consumption as well as previous report of acrylamide monitoring. These food samples were prepared to table-ready state according to the standard cooking methods for TDS. Acrylamide was detected in 33 samples from selected 186 samples. Cooking with high temperature such as sautéing, frying or roasting increased

acrylamide level. On the other hand, cooking method of boiling in water decreased levels of acrylamide in foods. Estimated mean dietary exposure for general population was 71 ng/kg bw/day based on the data of acrylamide analysis and food intake of KNHANES (2010). Potatoes, biscuits and black pepper accounted for the most of the exposure. With the average and high (95th percentile) level of dietary exposure, the margin of exposure (MOE) and lifetime cancer risk were calculated for cancer. The results show that the risk of acrylamide from Korean diet is relatively low compared to the other countries but still poses health concerns. Thus, campaigning of standard cooking method for reducing acrylamide and continuous monitoring seem to be necessary.

Keywords: Acrylamide, Korean food, Total diet study, Dietary exposure, Risk assessment.

Student number: 2011–21636

Appendix

Appendix A. Matching name of Korean dish with cooking method in each food

식품명	조리법	음식명
누룽지	그대로	건누룽지, 누룽지(건), 마른누룽지, 말린누룽지
	끓이기	누룽지, 누룽지밥
감자	조리전	감자
	끓이기	찜, 조림, 찌개, 국, 전골, 죽, 감자밥, 수제비, 감자옹심이, 탕(그라탕제외), 스프, 샐러드(새러드), 스투, 백숙, 삶은감자, 찢감자, 샌드위치, 울면, 오향장육, 햄말이, 밥
	볶기	볶(달볶음탕, 닭볶음탕포함), 볶음밥, 전, 고로케, 짜장, 자장, 닭갈비, 불고기, 닭날개, 부침개, 빈대떡, 장떡, 동그랑땡, 카레라이스, 하이라이스, 오므라이스, 카레, 불고기
	굽기	구이, 구운, 그라탕, 웨지감자
들깨	그대로	무침, 나물(콩나물국제외), 생채, 쥬스, 들깨가루, 음료, 구이, 볶음(닭볶음탕제외), 선식, 수육, 들깨강정, 장아찌, 쌈장, 양념장, 겉절이, 요구르트, 비빔국수
	끓이기	탕, 국(비빔국수제외), 찌개, 죽, 찜, 조림, 들깨차, 수제비
갯잎	그대로	찜, 조림, 탕, 전골, 국, 국수, 나물(나물볶음제외), 장아찌, 무침, 김치, 볶음밥제외한 밥, 김밥, 갯잎, 생갯잎, 겉절이, 찌개, 갯잎채, 데친, 냉채, 마끼, 더덕잎, 방아잎, 양념갯잎, 찢갯잎, 초회, 육개장, 대구살
	볶기	볶, 전, 튀김, 불고기, 닭갈비, 빈대떡, 계란말이
당근	그대로	찜, 샐러드, 떡볶이(떡볶이), 탕(볶음탕, 찜뽕탕제외), 국(찜뽕국제외), 찌개, 전골, 무침, 나물(나물튀김, 나물비빔밥, 콩나물볶음, 콩나물불고기, 콩나물비빔밥, 콩나물잡채제외), 수제비, 죽, 스프, 밥(영양밥, 곤드레밥, 낙지굴밥, 롤초밥, 무밥, 브로컬리밥, 주먹밥, 야채밥, 영양밥, 회비빔밥), 샐러드(샐러드), 생당근, 샌드위치, 조림, 스투, 냉채, 쥬스(쥬스), 당근, 생채, 월남쌈, 초회, 소면, 라면, 밀면, 온면, 쫄면, 백숙, 마끼, 음료, 이유식, 양념, 겉절이, 롤, 오향장육, 마자반, 국수, 국물, 스테이크
	볶기	볶, 튀김, 통닭, 치킨, 탕수육, 덮밥, 산적, 구이, 동그랑땡, 찜뽕, 짜장(짜장떡볶이, 자장떡볶이제외), 자장, 카레(카레떡볶이제외), 하이라이스, 오므라이스, 탕수, 불고기, 김밥, 잡채, 부침, 전, 완자전, 말이, 닭갈비, 야끼(타코야끼, 오꼬노미야끼), 스파게티, 닭날개, 양념닭다리, 꼬치, 빵, 갈비, 파스타, 고로케, 소세지, 빈대떡, 장떡, 짜파게티, 까스, 구운, 류산슬밥, 칠리새우, 크림새우, 오믈렛, 핫케이크, 도리아, 라조육, 리조또, 비빔밥(회비빔밥제외), 사천탕면, 양장피, 탕평채, 양고기, 궁중, 토스트, 비빔만두, 경단

식품명	조리법	음식명
마늘	그대로	샤브샤브(샤브샤브), 떡볶이(떡볶이), 라볶이, 제장, 백숙, 육개장, 닭계장(닭계장), 찌개(김치찌개볶음밥제외), 지개, 국(짬뽕국제외), 찜, 찐, 탕(그라탕, 볶음탕, 짬뽕탕제외), 육수, 곁절이, 만두, 딤섬, 수육(탕수육제외), 편육, 보쌈, 족발(족발볶음제외), 웅심이, 된장국, 무침(탕평채무침제외), 장아찌, 조림, 식혜(식해), 나물, 회, 우동(우동볶음, 야끼우동), 전골, 죽, 수제비, 국수, 샐러드, 치킨샐러드, 곤드레밥, 국밥, 콩나물밥, 무밥, 굴밥, 나물밥, 야채밥, 젓(젓볶음제외), 오향장육, 탕국물, 골뱅이소면, 시금치, 숙부쟁이, 야채반찬, 절임, 고구마줄기, 미역줄기, 냉채, 파채, 생채, 소박이, 냉면, 라면, 도토리묵, 꼬막, 꽃게, 비지, 기스면, 밀면, 온면, 완당면, 울면, 쫄면, 마늘, 절편, 무쌈, 쌈무, 쌈장, 숙채, 지리, 소스, 양념, 간장, 간장새우, 오이지, 월남쌈, 스프링롤, 콩자반, 무말랭이, 순대, 단호박, 겨자채, 돔양궁, 동양궁, 석박지(섞박지), 우도가니, 짜사이, 북어포양념, 호박고지, 호박범벅, 흑마늘, 고추, 피클, 생마늘, 달래, 초고추장, 고추장, 해선장, 기름장, 새우장, 양념장, 양념장, 우렁쌈장, 김치, 매운탕, 국물, 무국, 미역국, 청국장, 토란국
	볶기	볶(떡볶이, 라볶이제외), 떡볶음, 찐, 완자전, 전가복, 꼼장어(꼼장어찌개 제외), 말이(잡채말이어묵조림제외), 자장면, 자장소스, 짜장(짜장떡볶이 제외), 카레(카레떡볶이제외), 짬뽕, 짬뽕밥, 짬뽕국, 카레라이스, 오크라이스, 하이라이스, 군마늘, 군만두, 납작만두, 그라탕, 탕수육, 잡채, 동그랑땡, 두루치기, 산적, 스파게티, 지짐, 치킨(치킨샐러드제외), 통닭, 갈비(김치찌개등갈비제외), 갈비맛, 튀김, 돼지갈비궁, 구이, 구운, 곱창(곱창전골제외), 불고기(불고기버섯전골, 불고기전골 제외), 너비아니, 닭갈비, 스테이크, 덮밥(회덮밥제외), 비빔밥(회비빔밥제외), 김밥, 잡채밥, 카레밥, 잡탕밥, 유산슬, 류산슬, 야끼밥, 피자, 화양적, 립, 주물럭, 폭찜, 꼬치(꼬치우동 제외), 파스타, 마늘칩, 마늘환, 부침, 철판, 강정, 닭날개(닭날개조림제외), 닭다리후라이드, 양념닭다리, 야끼, 김자반(김자반무침제외), 불백, 마파두부, 새우까스, 토스트, 빈대떡, 간(간쇼새우, 간풍게, 간풍기), 파래자반(파래자반무침제외), 춘권, 소세지(소세지케첩조림제외), 양념닭, 해물경단, 키조개(키조개미역국제외), 대구살, 사천탕, 탕평채, 양고기, 돼지고기, 쇠고기, 오리고기, 궁중, 야끼우동
부추	그대로	나물, 무침, 국, 찌개, 곁절이, 탕, 찜, 찐, 딤섬, 콩만두, 고기만두, 야채만두, 왕만두, 만두, 양념장, 소스, 생채, 라면, 김밥, 비빔밥, 닭계장, 조림, 떡볶이, 삶은, 생, 수제비, 샐러드, 김치, 부추
	부치기	부침, 전, 볶(떡볶이제외), 잡채(고기잡채전만두제외), 갈비맛, 계란말이, 고로케, 부추장떡, 부추빈대떡, 두루치기, 양장피

식품명	조리법	음식명
생강	조리전	무침, 조림, 걸절이, 찜, 찢, 죽, 국(짜뽕국제외), 탕(닭볶음탕, 짜뽕탕제외), 샐러드, 계장, 전골, 찌개, 나물(나물볶음제외), 절임, 냉면, 장아찌, 만두, 꽃게, 족발, 수육, 편육, 보쌈, 생강(생강절임, 조림, 차, 채, 편), 지리, 백숙, 육개장, 닭계장, 닭개장, 콩자반, 생채, 탕면, 딤섬, 스프링롤, 쌈장, 양념장, 석박지, 쉬박지, 온면, 완당면, 대추차, 오향장육, 김치
	볶기	볶, 구이, 튀김, 강정, 군만두, 불고기, 치킨(치킨샐러드제외), 후라이드, 마파두부, 짜뽕, 폭찹, 립, 갈비, 돼지갈비궁, 납작만두, 춘권, 주물럭, 자장, 짜장, 두루치기, 지짐, 깐풍기, 훈제(훈제샐러드제외), 곱창, 돼지껍데기, 철판, 완자전, 스테이크, 라조육, 갈비맛, 돼지고기, 쇠고기, 오리고기
돼지고기	조리전	-
	끓이기	찜, 삶은목삼겹, 조림, 탕, 국, 찌개, 지개, 편육, 보쌈, 족발, 수육(탕수육제외), 전골, 찢(찢만두), 물만두, 왕만두, 고기만두, 야채만두, 김치만두, 콩만두, 만두, 딤섬, 비지, 오향장육, 완당면, 설렁탕
	볶기	볶, 잡채(잡채전만두제외), 짜장, 자장, 자장, 카레, 하이라이스, 불고기(불고기스테이크제외), 돈까스, 돈가스, 두루치기, 고로케, 도리아, 스프링롤, 춘권, 철판요리, 마파두부, 곱창, 지짐, 강정, 탕수육, 밥(볶음밥, 김밥, 짜장밥, 잡탕밥, 콩나물밥 등), 전, 완자전, 빈대떡, 부침개, 동그랑땡, 햄버거, 주물럭, 납작만두, 양장피, 고사리나물, 전병
쇠고기,수입우	굽기	구이, 군만두, 스테이크, 돼지갈비, 돼지고기궁, 갈비(김치찌개등갈비제외), 갈비맛, 산적, 훈제, 바베큐, 바비큐, 폭찹, 립, 피자(피자돈까스제외), 돼지고기, 튀김, 리조또, 돼지껍데기
	조리전, 끓이기, 볶기	국, 탕(그라탕제외), 잡채, 육수, 전, 전골, 무침, 밥, 국수, 마끼, 볶, 스파게티(오븐, 빵제외), 까르보나라, 말이, 찜, 불고기, 고추장, 동그랑땡, 샤브, 녹두묵, 스프, 찌개, 파스타, 찢, 냉면, 카레(카레튀김제외), 햄버거, 밀면, 죽, 조림, 채(냉채, 겨자채), 수육, 육개장, 육회, 편육, 샐러드, 오므라이스, 우도가니
	굽기	구이, 피자, 산적, 갈비, 스테이크, 그라탕, 너비아니, 화양적, 우삼겹, 튀김, 오븐, 라자냐, 쇠고기, 양고기(양념), 꼬치, 차돌박이
쇠고기,부산물	조리전, 끓이기, 찌기	탕, 국, 찌개, 순대, 소간, 전골, 소지라, 우도가니
	굽기	곱창(곱창전골제외), 구이, 볶음, 천엽
장어	조리전	탕, 회, 국, 초밥(광어, 문어, 새우, 생선, 연어, 전복, 회초밥, 흰살생선초밥)
	굽기	구이, 샐러드, 꼬장어, 꼬장어볶음, 장어덮밥, 초밥, 장어초밥, 장어뼈튀김

식품명	조리법	음식명
김	그대로	김밥, 집밥, 롤초밥, 롤, 김장아찌, 파래김, 마른김, 생김
	굽기	구이, 구운, 튀김, 말이, 볶, 강정, 김밥과 초밥을 제외한 밥, 김가루, 무침, 국수, 김자반, 녹두묵, 국, 우동, 라면, 당과, 부각, 모밀, 메밀, 김, 밀면, 양념간장, 실곤약샐러드, 유부초밥
참기름	그대로, 끓이기	참기름, 기름장, 소금장, 냉국, 샐러드, 겉절이, 김치(돼지고기볶음, 김치제외), 장아찌, 회덮밥, 무침(탕평채무침제외), 물회, 간장(간장조림, 간장볶음, 장어구이제외), 피클, 냉면, 밀면, 냉채, 생채, 육회, 나물, 나물밥, 마끼, 쫄면, 회, 젓(젓볶음제외), 알밥, 도토리묵, 국수, 곤드레밥, 초밥, 주먹밥(김치볶음주먹밥제외), 무밥, 브로컬리밥, 야채밥, 절임, 절이, 단무지, 후라이, 고추장, 꼬막, 두부양념, 쌈무, 무쌈, 양념장, 쌈장, 달래장, 된장, 녹두묵, 겨자채, 무말랭이, 숙채, 시금치, 오이지, 물, 비빔면, 소금기름, 파채, 팔보채, 토스트, 마음료, 야채만찬, 보쌈, 짜사이, 양념, 마자반(모자반), 썩부쟁이, 비빔밥, 김밥(김밥), 탕, 찌개, 전골, 찜, 조림, 국(짬뽕제외), 수제비, 만두(튀김, 군만두, 납작만두 제외), 죽, 약밥, 약식, 꽃게, 백숙, 육개장, 라면, 떡볶이, 개장, 해선장, 미역된장, 누룽지, 덩섬, 장어소스, 체리소스, 콩자반, 완당면, 호박범벅, 단호박
	볶기	볶, 구이, 곱창, 불고기, 덮밥(회덮밥제외), 부침, 튀김, 두루치기, 지짐, 산적, 전, 동그랑땡, 갈비, 강정, 주물럭, 카레, 계란말이, 야채말이, 꼬장어, 양고기, 오리고기, 철판, 꼬치, 립, 폭찹, 닭(닭똥집, 닭발, 닭갈비 등), 너비아니, 유산슬, 류산슬, 짬뽕, 짬뽕국, 화양적, 춘권, 대구살, 마파두부, 전가복, 간풍기, 키조개, 잡채, 탕평채, 불백, 궁중
후추,분말	조리전	샐러드, 국(짬뽕국 제외), 탕(닭볶음탕, 짬뽕탕, 탕수육제외), 찜, 찌개, 떡볶이, 전골, 계장, 조림, 치킨양념, 나물, 찢, 무침, 후추, 후춧가루, 죽, 꽃게, 만두(만두튀김, 군만두, 납작만두, 튀김만두제외), 치킨양념, 기름장, 고추장, 육수, 백숙, 육개장, 육회, 곤드레밥, 덩섬, 샌드위치, 장아찌, 양념, 콩자반, 알밥, 녹두묵, 닭계장, 닭개장, 스투, 젓밥, 순대, 온면, 우도가니, 스프, 스프링롤, 녹두묵, 야채밥, 브로컬리밥, 알밥, 콩자반, 회비빔밥
	볶기	볶(떡볶이제외), 스파게티(스파게티떡볶이제외), 카레라이스, 오프라이스, 카레(카레돈까스제외), 마파두부, 불고기(전골제외), 비빔밥(회비빔밥, 제외), 김밥, 잡채(고기잡채편만두, 잡채만두튀김 제외), 닭갈비, 전, 산적, 군만두, 납작만두, 동그랑땡(동그랑땡구이제외), 곱창, 두루치기, 지짐, 주물럭, 빈대떡, 덮밥, 부침, 화양적, 오키노미야끼, 오키노미야끼, 말이, 철판, 햄버거(햄버거스테이크제외), 돼지껍데기, 경단, 짬뽕, 사천탕면, 완자전, 잡탕밥

식품명	조리법	음식명
	튀기기	튀김, 치킨(구운치킨, 굽네치킨, 바베큐치킨, 숯불구이치킨, 치킨잡스스테이크, 훈제치킨, 치킨샐러드제외), 돈까스, 돈가스, 커틀렛, 강정, 후라이드, 새우까스, 생선까스, 양념닭다리, 깐풍기, 깐풍게, 탕수육, 춘권, 콜팝, 라조육, 유린기
	굽기	구이, 구운, 굽네치킨, 바비큐(바베큐양념닭튀김제외), 숯불, 스테이크, 훈제(훈제샐러드제외), 오리로스, 로스구이, 다꼬야끼, 타꼬야끼, 타코야끼, 립, 핫윙, 갈비(닭갈비, 닭튀김갈비제외), 갈비맛, 갈비궁, 통닭, 통달가슴살, 양고기, 궁중